

水産総合研究センター 研究報告

34

平成23年 1 月

BULLETIN OF FISHERIES RESEARCH AGENCY

No. 34
January 2011

Library

Pacific Islands Fisheries Science Center

NOAA Fisheries

Received 15 Apr 2011



独立行政法人 水産総合研究センター
神奈川県横浜市

FISHERIES RESEARCH AGENCY
Yokohama, Kanagawa, Japan



Digitized by the Internet Archive
in 2026

序

平成18年度に地域連携プロジェクト研究として取り組んだ課題名「内湾域の水産業に対する適正栄養塩レベルの現状把握と適正資源管理手法の開発（F S）」のうち、3編の成果をまとめた。

1970年代以降、赤潮による漁業被害の多発など内湾域の富栄養化が大きな社会問題となり、その後、COD や窒素・リンの総量規制が導入されるなど、汚濁負荷量の削減努力がなされてきた（瀬戸内海環境保全特別措置法など）。その一方で、窒素・リンに係わる水質の環境基準の導入によりバランスの悪い不安定な生態系に変化したとの指摘や瀬戸内海東部海域及び有明海を中心に、ノリなどの色落ち現象が起こりやすくなっている現実、さらには、水質は一般に改善傾向にある中で、アサリなどの漁獲量の激減、ノリの色落ちや生長不良などに象徴されるように、有用種の現存量の低下（環境収容力の低下？）の顕在化など、漁業に対する適正栄養塩レベルの把握が研究サイドばかりでなく、漁業者や行政サイドからも強く要請されている。

栄養塩の規制を緩めることで生産量が増えるのではとの期待があることを産業的ニーズと捉え、瀬戸内海や有明海など、我が国有数の内湾域を豊饒の海へ回帰させるために必要な環境とは何かを解明することを目標に、漁業や生物環境に関連した栄養塩をはじめとする物理・化学環境の望ましい水準を明らかにするための研究方向を具体化する目的で、食物連鎖を通した物質循環の量的あり方を明らかにするための研究レビューやデータの解析など必要な作業を11分野に分担して行った。本プロジェクト研究全体の研究項目と担当部署、想定図は以下のとおりである。

1. 研究項目と担当部署

1) 栄養塩と低次生産の関係

- ・栄養塩と植物プランクトン

瀬戸内水研生産環境部環境動態研

- ・大型藻類

同 藻場・干潟環境研

- ・ノリ

西海水研海区水産業研究部有明センター

2) 栄養塩と赤潮発生の関係

西海水研海区水産業研究部有明センター

3) 一次生産や底質環境の変化とベントス群集

養殖研生産システム部

増養殖システム研究グループ

4) 一次生産の変化と有用種の関係

- ・二枚貝：

瀬戸内水研生産環境部藻場・干潟環境研

- ・アサリを捕食するカレイ類

瀬戸内水研栽培資源部資源増殖研

- ・アマ類を捕食するヒラメ

瀬戸内水研栽培資源部栽培技術研

- ・カタクチイワシ

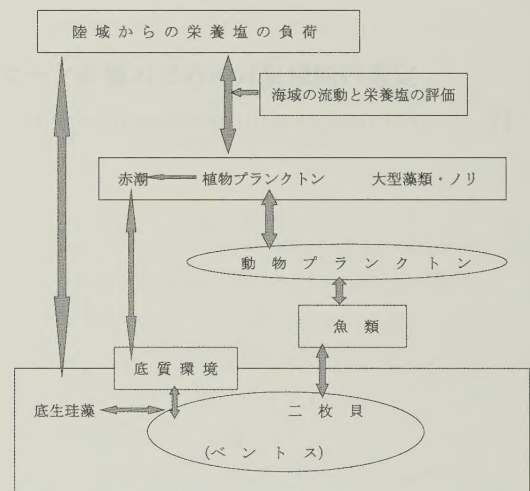
瀬戸内水研生産環境部沿岸資源研

- ・種苗生産（マダイ）

屋島栽培漁業センター

5) 海域の流動と栄養塩の評価

水工研水産土木工学部水理研



：食物連鎖関係（矢印をどこまで遡れるか、量的な関係がどうなっているかを明らかにすることがポイント）

研究推進リーダー：山崎 誠

瀬戸内海区水産研究所生産環境部長

（現在：養殖研究所生産システム部長）

水産総合研究センター研究報告

第34号

平成23年1月

目 次

(水産総合研究センター交付金プロジェクト研究成果報告)

海藻類の一次生産と栄養塩の関係に関する研究レビュー

—および瀬戸内海藻場の栄養塩環境の相対評価—

吉田吾郎・新村陽子・樽谷賢治・浜口昌巳 1

一次生産の変化と有用種の関係（二枚貝）

浜口昌巳 33

瀬戸内海の流動と栄養塩に関するレビューと流動・低次生産モデルの開発

中山哲厳 49

(原著論文)

水産学における学術論文のベンチマーク評価—ベンチマーク評価のための対象機関の選定

高野正嗣・伊藤智子・細羽見喬・大関芳沖 71

海藻類の一次生産と栄養塩の関係に関する研究レビュー — および瀬戸内海藻場の栄養塩環境の相対評価 —

吉田 吾郎^{*1}, 新村 陽子^{*1,2}, 樽谷 賢治^{*1}, 浜口 昌巳^{*1}

Research review on the relationship between macroalgal-production and nutrients, and relative assessment of the nutrient conditions on macroalgae in the Seto Inland Sea

Goro YOSHIDA^{*1}, Yoko NIIMURA^{*1,2}, Kenji TARUTANI^{*1} and Masami HAMAGUCHI^{*1}

Abstract : In recent years, nutrient concentrations in the Seto Inland Sea have been decreasing as a result of countermeasures for environmental improvement having implemented from the 1970's. From the viewpoint of sustainable fisheries, an alternative measure to maintain 'suitable nutrient level' has been sought instead of a uniform environmental criterion. Nitrogen and phosphorus in seawater often limit the production of macroalgae, which is fundamental for coastal fisheries production. In this report, past researches on the relationships between macroalgal production and nutrients are reviewed, i.e., on ambient DIN and DIP concentration ranges and nutrient-limitation situation of macroalgae in various sea areas, special characteristics of macroalgal nutrient uptake and reserves, their ecological significance, and physiological information which macroalgal tissue N and P content indicates on their nutritional condition, etc. Finally, the nutrient level in Hiroshima Bay, one of the nutrient-richest areas in the Seto Inland Sea, is assessed from the view of macroalgal physiological requirements.

Nutrient levels are higher in the inner area of Hiroshima Bay due to the effects of river discharge. Mean DIN and DIP concentrations during 1999-2006 were 6.04 and 0.45 μ M respectively, at a macroalgal habitat in this area (Maruishi, Hatsukaichi). *Ulva pertusa*, which causes 'green tide' in the inner area of the bay, showed severe N-limitation during its growing season in spring. On the other hand, nutrient levels at the macroalgal habitats in the central area and at the mouth of the bay were lower. Mean DIN and DIP concentrations during 2002-2003 were 1.99 and 0.25 μ M respectively at Itsuku-shima Is., and 1.57 and 0.25 μ M respectively at Yashiro-jima Is. Judging from their tissue nutrient contents, severe N and P limitation seemed not to occur in macroalgae growing in *Sargassum* beds in these areas, at least in their growing season in winter. The difference in nutrient level among the macroalgal habitats is attributable to the difference in oceanographical conditions among the locations in the bay, but the nutritional condition of macroalgae inhabiting also depends on their physiological strategy in growth and nutrient usage.

Future researches required to monitor and optimize conditions for 'suitable primary productivity' for sustainable fisheries are discussed.

Key words : macroalgae, nutrient, DIN, DIP, Seto Inland Sea, Hiroshima Bay

2010年8月30日受理 (Received on August 30, 2010)

*1 独立行政法人 水産総合研究センター 瀬戸内海区水産研究所 〒739-0452 広島県廿日市市丸石2-17-5

(National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency, 2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, Japan)

*2 現所属 海洋プランニング株式会社 名古屋事務所 〒455-0036 愛知県名古屋港区浜2-10-11

(Oceanic Planning Co. Ltd., Nagoya branch, 2-10-11 Hama, Minato, Nagoya, Aichi 455-0036, Japan)

目 次

第1章	緒言
第2章	世界各海域の海藻類生育地の栄養塩環境
2.1.	亜寒帯・温帯域
2.2.	富栄養化の進行した温帯沿岸域
2.3.	熱帯・亜熱帯海域
第3章	海藻類の栄養塩吸収・貯留能と一次生産における「適正栄養塩」レベル
3.1.	栄養塩吸収に関わる諸要因
3.2.	栄養塩の藻体内貯留とその生態学的意義
3.3.	藻体の窒素・リン含量が示す情報
3.4.	一次生産の「適正栄養塩」レベルについて論じた例
第4章	瀬戸内海の藻場の栄養塩環境とその相対評価
4.1.	既往資料における瀬戸内海・広島湾の栄養塩環境と藻場分布
4.2.	広島湾の藻場周辺の栄養塩環境
4.3.	窒素・リン含量に見る広島湾の海藻類の栄養状態
第5章	今後の課題
謝 辞	
文 献	

第1章 緒 言

瀬戸内海では、高度経済成長時代に進行した沿岸域開発にともなって海域の富栄養化が進行し、赤潮や貧酸素水塊が頻発するようになった。これに対し、行政の指導のもと汚濁負荷量の削減が進められ、近年では流入負荷が減少するなど一定の成果を見ている（清水ら、1998；山本ら、2002）。一方、近年、播磨灘・備讃瀬戸を中心に栄養塩不足による養殖ノリやワカメの色落ちが起り、多大な損害を生じるようになった（岡本、2008）。その直接的な原因は植物プランクトンとの栄養塩の競合であるが、瀬戸内海域の栄養塩レベルの減少が背景にあり、水産業にとっての適正な栄養塩レベルの解明と維持について具体的な施策が求められるようになっている（多田、2008）。

藻類養殖に加え、瀬戸内海には海産顕花植物のアマモ *Zostera marina* によるアマモ場や、大型褐藻のホンダワラ類によるガラモ場を中心に、現在約15,000haの藻場（環境庁自然保護局・財団法人海中公園センター、1994）が存在し、重要な沿岸漁場となっている。藻場では、海藻類が極めて高密度に生育しているため、養殖ノリやワカメと同様、海域の栄養塩レベルの低下がその一次生産に影響を及ぼしている可能性がある。

世界的にみても、海域を問わず、藻場を構成する海藻類の一次生産が、周年もしくは1年のある時期に栄養塩制限状態にあるという報告は極めて多い。しかし、瀬戸内海においては、富栄養化の問題が取り上げられることが多く、天然の海藻の一次生産に対し栄養塩が不足しているという研究的視点は存在しなかった。瀬戸内海では、1960年時にはアマモ場だけで23,000ha以上が存在していたが、アマモ場は高度経済成長時代を経て1971年までに約4分の1の5,574haに減少し、現在に至っている。その減少の主要な要因は、埋め立てによる直接的な消失や、透明度の低下など水質の悪化による衰退である（社団法人瀬戸内海環境保全協会、2007；玉置ら、1999；平岡ら、2001）。現在、瀬戸内海における藻場の再生は、沿岸域の環境保全と水産資源の持続的生産のため、緊急の課題と位置づけられている。その施策を講ずるにあたり、藻場の生態的機能の根本である海藻類の一次生産を維持する上で、瀬戸内海の栄養塩がどのようなレベルにあるのか、把握しておく必要がある。

本報告では、海藻類の一次生産と栄養塩の関係について論じた既往研究のレビューを行った。まず、第2章では世界の各海域の海藻類の生育する栄養塩環境、すなわち栄養塩濃度とその年変動範囲に関する知見を整理した。第3章では、栄養塩環境に対する海藻類の適応機構としての栄養塩の吸収と藻体内貯留能について既往知見を整理するとともに、海藻類の“栄養状態”の指標となる藻体内窒素・リン含量に関する知見や、海藻類の一次生産に最適な栄養塩濃度レベルについて論じた事例をまとめた。さらに、第4章では、瀬戸内海・広島湾の藻場周辺の栄養塩濃度と、海藻類の窒素・リン含量の実測値を示し、レビューした他海域の値と比較した。海藻類と栄養塩の関係について論じた既往文献の数は膨大であり、必ずしも全ての研究事例を網羅できたわけではないが、上記の作業を通じて瀬戸内海の藻場の栄養塩環境の相対的評価を試みた。

なお、本報文では、砂泥中から栄養塩を吸収できるアマモなどの海草類については、レビューおよび評価の対象からはずし、別の機会に譲った。また、レビューした文献中の海藻類の学名については、その後変更になっているものも多数存在したが基本的に原著に従い、海外の文献中の海藻類で標準和名を有するものについては吉田（1998）に従い、学名と併記した。

第2章 世界各海域の海藻類生育地の栄養塩環境

まず、既往文献に示されている世界各海域の海藻類生育地の栄養塩濃度の年間の変動範囲を Table 1にま

とめた。1年生コンブ類やアマノリ類などその出現に季節性のある種については、栄養塩濃度も該当する季節についてのみ記載されている場合がほとんどであったので、原著に従った。また、対象は天然の生育地に関するものとどめ、養殖場におけるものについては含めなかった。栄養塩濃度の変動について、文献中に具体的数値の記述が無く図示のみである場合は、その季節変動の上限・下限値をグラフ上で読み取った。また、研究対象である海藻類の成長が、窒素もしくはリンのどちらかの栄養塩による制限を受けている場合、もしくは制限を受けていない場合について、文献中に明記してあるものについては Table 1 中に記述した。これらをもとに、世界の海藻類生育地の栄養塩環境の特性を、(1)亜寒帯・温帯域、(2)富栄養化の進行した温帯沿岸域、(3)熱帯・亜熱帯域に大別し、それぞれについて概観した。

2.1. 亜寒帯・温帯域

亜寒帯・温帯沿岸域の栄養塩濃度は、一般的に夏季に減少（もしくは枯渇）し、冬季に増加する明瞭な季節変動を示す (Fig. 1a)。多くの海域では、冬季には鉛直混合などにより栄養塩が供給され、溶存態無機態窒素 (DIN) で $5\sim 10\mu\text{M}$ 以上、時には数 $10\mu\text{M}$ 以上の濃度になるのに対し、夏季には $1\mu\text{M}$ 以下の期間が数カ月間持続することもある (e.g. Jackson, 1977; Chapman and Craigie, 1977; Asare and Harlin, 1983; etc.)。また、一般的に硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) が重要であり、DIN 濃度におけるアンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) の貢献は小さいことが多い。溶存態無機リン (DIP) については、必ずしも明瞭な季節変化を示さない場合も多い (e.g. Chapman and Craigie, 1977) が、およそ $0.1\sim 2\mu\text{M}$ の範囲で変動する (Table 1)。

Table 1. Seasonal changes in nutrients in seawater at various macroalgal habitats.

*; data were read on the original figures

Species	Location	DIN (μM)	DIP (μM)	Remark	Citation
arctic					
<i>Laminaria solidungula</i>	Iqloolik Is. (Canada)	0 – 10	*0.2 – 1.8		Chapman & Lindley (1980)
cold temperate					
<i>Laminaria longicuris</i>	Quebec (Canada)	0.25 – 14 (NO_3)	*0.3 – 1.4	no limitation of N	Anderson <i>et al.</i> (1981)
<i>L. longicuris</i>	Nova Scotia (Canada)	*0.4 – 6<	0.2 – 0.8	N limitation in summer	Chapman & Craigie (1977)
<i>L. longicuris</i>	Boutillier Point, Nova Scotia (Ca)	*0 – 5.2	*0.3 – 0.8	N limitation in summer	Gagné <i>et al.</i> (1982)
<i>L. longicuris</i>	Centreville, Nova Scotia (Ca)	*3.0 – 9.0	*0.6 – 1.0	no limitation of N	Gagné <i>et al.</i> (1982)
<i>L. longicuris</i>	Quebec (Canada)	*4.0 – 21	–	no limitation of N	Gendron (1989)
<i>L. japonica</i>	Osatsube (Japan)	<1 – 15	0.1 – 1.6		Maita <i>et al.</i> (1991)
<i>L. digitata</i> , <i>L. saccharina</i>	St. Andrews (Scotland)	*4 – 50	*0.6 – 37.4	eutrophication	Conolly & Drew (1985)
<i>L. digitata</i> , <i>L. saccharina</i>	Fifeness (Scotland)	* <1 – 33	*0.1 – 2.2	N and P limitation	Conolly & Drew (1985)
<i>Laminaria religiosa</i>	Tomari (Japan)	0 – 6.4	0.06 – 0.45		Dotsu <i>et al.</i> (1999)
<i>Macrocystis integrifolia</i>	Vancouver Is. (Canada)	0 – 23.8 (NO_3)	–		Wheeler & Srivastava (1984)
<i>Codium fragile</i>	Camp Varnum, Rhode Island (USA)	*1 – 18< (NH_4)	*0.5 – 2	N limitation in summer	Hanisak (1979a)
<i>Monostroma</i> , <i>Ceramium</i> , others	Baltic Sea (Sweden)	* <1 – 5.4	*0 – 0.8		Wallentinus (1984)
<i>Chordaria flagelliformis</i>	Cranberry Cove (Canada)	*0.5< – 4	*0.2 – 0.5		Probyn & Chapman (1983)
<i>Ulva lactuca</i>	New England Embayment (USA)	*4 – 16 (NO_3+NH_4)	–	green tide, N limitation in summer	Rivers & Peckol (1995)
<i>Fucus vesiculosus</i> , others	Rhode Island Sound (USA)	* <1.0 – 8.0< (NO_3+NH_4)	–		Asare & Harlin (1983)
<i>Fucus vesiculosus</i>	Strande (Kiel Bight, Germany)	*4 – 54	*0.3 – 2.4	no limitation of N and P	Schramm <i>et al.</i> (1988)
<i>Phycodrys rubens</i>	Kleversberg (Kiel Bight, Germany)	*3 – 30	*0.1 – 2.0	N limitation in summer	Schramm <i>et al.</i> (1988)
<i>Ulva rigida</i> , <i>Pelvetipsis limitata</i>	Yaquina head (Oregon, USA)	* <1 – 30 (NO_3+NH_4)	*0 – 3		Fujita <i>et al.</i> (1989)
warm temperate					
<i>Phyllariopsis purpurascens</i>	Estepona (Spain)	*14.0< – 18 (NO_3+NH_4)	*0 – 4.5	P limitation in October	Flores-Moya <i>et al.</i> (1995)
<i>Undaria pinnatifida</i>	Port Phillip Bay (Australia)	*2 – 7	*2 – 14	N limitation in summer	Campbell <i>et al.</i> (1999)
<i>Macrocystis pyrifera</i>	Cameo Shores (Ca, USA)	0 – 6.7 (NO_3)	–	no relation with growth	Wheeler & North (1981)
<i>M. pyrifera</i>	Crystal Cove (Ca, USA)	0 – 17.8 (NO_3)	–		Wheeler & North (1981)
<i>M. pyrifera</i>	San Diego (Ca, USA)	* <1 – 10.8 (NO_3+NH_4)	*0.2 – <1.2	N limitation in summer	Jackson (1977)
<i>Cladophora aff. albida</i>	Peel Inlet (Australia)	*3.4 – 164	*0.65 – 4.8	green tide, P limitation in summer	Birch <i>et al.</i> (1981)
<i>Porphyrha umbilicalis</i>	Lagos (Spain)	*8.9 – 23.6	*0.25 – 0.63	P limitation in winter	Hernández <i>et al.</i> (1993a, b)
<i>Ulva rigida</i>	Lido, Venice (Italy)	<3 – 60	*0.1 – 3.5	green tide	Sfriso & Marcomini (1997)
<i>U. rigida</i>	Thau Lagoon (France)	10.5 – 247.9	*0 – 12	green tide	De Casabianca & Posada (1998)
<i>U. rigida</i>	Sacca sessola (Venice, Italy)	4.42 – 144	3 – 209	green tide	Sfriso (1995)
<i>Ulva</i> sp.	Uranouchi (Kochi, Japan)	* <1 – 5.5	0.3 – 2.6	green tide	Ohno (1988)
<i>Ulva</i> sp.	Nojima (Yokohama, Japan)	*8 – 67	*0.3 – 2.4	green tide	Kudo (1999)
<i>Chondrus crispus</i>	Brittany (France)	–	*0.13 – 0.9		Chopin <i>et al.</i> (1989)
<i>Sargassum</i> , <i>Melobesioideae</i> , others	Tei (Kochi, Japan)	0.2 – 2.7	0 – 0.6		Serisawa <i>et al.</i> (1998)
<i>Padina</i> , <i>Ulva</i> , <i>Codium</i> , others	Yokonami (Kochi, Japan)	0.31 – 6.5	0 – 0.65		Serisawa <i>et al.</i> (1995)
<i>Sargassum duplicatum</i>	Ibusuki (Kagoshima, Japan)	1.10 – 7.14	0.02 – 0.87		Shimabukuro <i>et al.</i> (2007)
sub-tropical					
<i>Dictyosphaeria cavernosa</i>	Kane'ohe Bay (Hawaii, USA)	*0.05 – 1	*0.06 – 0.16	N limitation	Larned & Stimson (1996)
<i>Padina</i> , <i>Caulerpa</i> , others	Kane'ohe Bay (Hawaii, USA)	*0 – 2.3	*0.03 – 0.39	N limitation	Larned (1998)
<i>Gracilaria</i> , <i>Laurencia</i> , others	Florida Bay (USA)	*0.6 – 3.4	*0.05 – 0.18	P limitation	Lapointe (1989)
<i>Sargassum sandei</i> , others	Hengchuan Pen. (Taiwan)	*0 – <40	*0 – 1.7	N and P limitation	Hwang <i>et al.</i> (2004)

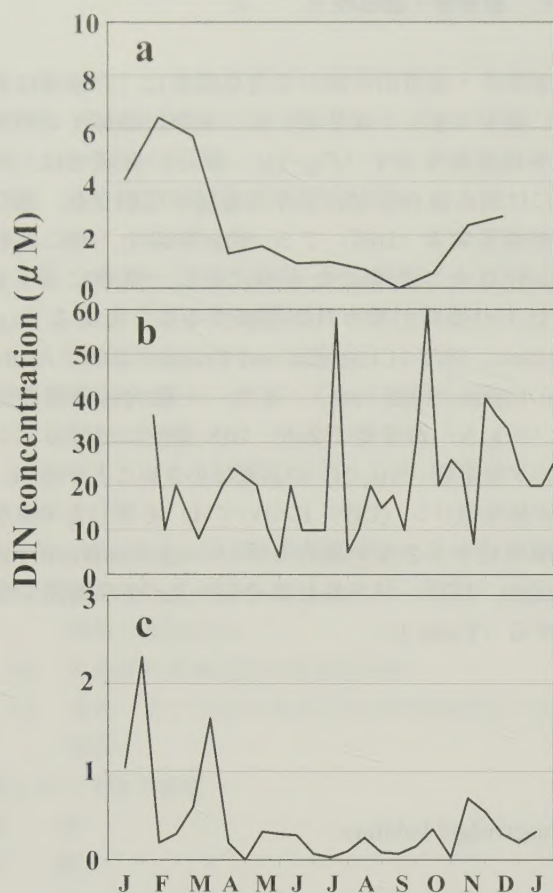


Fig. 1. Seasonal changes in DIN concentration at three macroalgal habitats. a; cold temperate area (*Laminaria* habitat) in Hokkaido, Japan (Dotsu *et al.* 1999), b; eutrophic temperate area (*Ulva* habitat) in Venice, Italy (Sfriso and Marcomini 1997), c; subtropical coral area in Oahu, Hawaii (Larned 1998).

亜寒帯・温帯域における海藻類の一次生産と栄養塩の関係については、特に褐藻コンブ目 *Laminariales* を対象とする研究が多い。これらの種は、極めて高い年間生産量を有し沿岸域において大きな生態学的インパクトを有していること (Mann, 1972a, b), さらに化学工業など産業的な意義 (Rosell and Srivastava, 1985) から、その生産力と環境要因との関係について解明が進められてきた。

コンブ目に属する海藻類、いわゆるケルプ類は、多くの場合夏季に成長率が低下するため、その生産力と栄養塩濃度、特に DIN との関係が注目されていた。カナダ・Nova Scotia のコンブ類の 1 種 *Laminaria longicruris* の成長率は、水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ が枯渇する夏季に低下し、 $6\sim7\mu\text{M}$ まで増加する冬季に上昇する (Chapman and Craigie, 1977)。Chapman らが行っ

た実験では、夏季に $\text{NO}_3\text{-N}$ を施肥することにより成長率の向上を見、同種の夏季の成長が窒素制限であることが示された (Chapman and Craigie, 1977)。一方、夏季においてもあるレベル以上の DIN 濃度が見られる海域のコンブ類については、夏季の栄養塩制限は見られない傾向がある。カナダ・ケベック州の沿岸におけるコンブ類 *L. longicruris* の成長率は、夏季の $\text{NO}_3\text{-N}$ の枯渇期間が短いあるいは $\text{NH}_4\text{-N}$ が豊富なため、結氷による光量の減少と低水温により成長が制限される冬季よりも高い (Anderson *et al.*, 1981; Gendron, 1989)。また、Chapman らにより夏季の窒素制限が観察された Nova Scotia 地方でも、場所により栄養塩環境は異なっており、コンブ類 *L. longicruris* も異なる成長パターンを示す。すなわち、夏季に DIN が枯渇する同地の Boulter Point では Chapman and Craigie (1977) の報告と同一の成長パターンを示したのに対し、沿岸湧昇の影響で周年 DIN 濃度が高い Centreville では夏季にも良く成長し、成長率はむしろ光量の変動と関連した (Gagné *et al.*, 1982)。スコットランドの Fife 地方沿岸では富栄養化の勾配に伴いコンブ類の成長率も変化し、最も栄養塩の豊富な St. Andrews のコンブ類は、夏季に他生育地と比較し最大で約 4 倍の成長率を示した (Conolly and Drew, 1985)。これらの夏季にもコンブ類が良好な成長を示す海域の DIN 濃度は、温帯域に特徴的な夏季の減少、冬季の増加の変動を示しながらも、夏季の枯渇期間が極めて短いか、 $3\sim4\mu\text{M}$ 以下には下がらないことが特徴である。

コンブ目の *Macrocystis pyrifera*、いわゆるジャイアントケルプは、その全長が 10m 以上に達する。生育地である米国・南カリフォルニアの沿岸では、DIN (主に NO_3) は夏季から秋季に $1\mu\text{M}$ 以下もしくは検出限界以下になり、陸水流入や湧昇、水柱混合のある冬季から春季に最大で $7\sim18\mu\text{M}$ 程度まで増加する (Jackson, 1977; Wheeler and North, 1981; Zimmermann and Kremer, 1986)。同海域では、ジャイアントケルプの藻体下部が位置する水深 10m 付近に比べ、林冠が発達し光合成も最も活発に行われる表層付近で周年 DIN 濃度が低い。従って、藻体下部から上部へのアミノ酸などの窒素同化物の転流がジャイアントケルプの生産力の維持に重要な役割を果たしている (Jackson, 1977; Wheeler and North, 1981; Gerard, 1982a)。底層の DIN も減少する夏季には林冠の脱落 (Jackson, 1977) や、成長率の大幅な低下がみられる (Zimmerman and Kremer, 1986)。しかし、同じカリフォルニア州沿岸域でも、Wheeler and North (1981) の調査地では夏季の成長率の低下

は見られなかった。彼らの調査地では、夏季にも底層の DIN が $1\ \mu\text{M}$ 以下になる期間は1カ月未満と短く、何らかの他の栄養塩供給機構が作用しているか、また、藻体内に貯えた窒素を活用することにより (Gerard, 1982a), 生産力が維持されていると考えられる。本種の幼体の成長についても窒素制限が認められる (Wheeler and North, 1980) が、成体の林冠の下部に生育するため、その生残には光条件がより重要である (Dean and Jacobsen, 1984)。

コンブ目以外の褐藻については、前出のカナダ・Nova Scotia や北米の大西洋岸で、ヒバマタ目 Fucales の種 (Topinka and Robbins, 1976; Rosenberg *et al.*, 1984) やナガマツモ *Chordaria flagelliformis* (Rosenberg *et al.*, 1984) などが夏季に窒素制限を受けているが、これらの生育地では春季から夏季に DIN 濃度が数カ月にわたり $1\ \mu\text{M}$ 以下になる (Rosenberg *et al.*, 1984)。また、他海域では、我が国北海道のマコンブ *L. japonica* で、コンブ類に一般的な春季～夏季の栄養塩不足による成長の低下が見られる (Maita *et al.*, 1991; Mizuta *et al.*, 1994; 道津ら, 1999)。栄養塩濃度は示されていないが、南半球でもオーストラリア沿岸に移入したワカメ *Undaria pinnatifida* で夏季の窒素制限が報告されている (Campbell *et al.*, 1999)。また、紅藻ツノマタ *Chondrus crispus* は夏季の栄養塩低下時に、コンブ類やヒバマタ類同様に藻体内の窒素含量 (第3章参照) が激減する (Asare and Harlin, 1983)。北大西洋沿岸で採集したツノマタやオゴノリ類 *Gracilaria* などの紅藻類は海水中に窒素源を添加することにより成長が増加しており (Neish *et al.*, 1977; DeBoer *et al.*, 1978), 褐藻類同様夏季には窒素制限状態にあるものと思われる。一方、富栄養化により夏季にも $3\sim 4\ \mu\text{M}$ 以上の DIN がある西部バルト海では、紅藻カシワバコノハノリ *Phycodrys rubens* には窒素制限が認められるが、ヒバマタ類 *Fucus vesiculosus* には認められない (Schramm *et al.*, 1988) など、種により栄養塩制限状態が異なることも報告されている。

上記のように、亜寒帯・温帯域ではリンよりも窒素が海藻類の一次生産の主要な制限要因となっているという報告が多い。しかし、ジブラルタル、マラガ等のスペイン南部沿岸では海水中に $\text{NH}_4\text{-N}$ が豊富であり、ほぼ周年を通じて $10\ \mu\text{M}$ 以上の DIN 濃度が見られ、1年生のケルプ類 *Phyllariopsis purpurascens* やチシマクロノリ *Porphyra umbilicalis* では、生育期終盤にリン制限が認められる (Hernández *et al.*, 1993a, b; Flores-Moya *et al.*, 1995)。また、日本海の外海に面した場所に生育するホンダワラ類ウミ

トラノオ *Sargassum thunbergii* では、窒素とリンを同時に添加した場合にのみ顕著な光合成能の増加が認められるが、それぞれ単独の添加では認められず、生理的には双方が足りないことが示唆されている (Gao and Nakahara, 1990)。米国・オレゴン州の Yaquina Head では湧昇により $7\sim 28\ \mu\text{M}$ の $\text{NO}_3\text{-N}$, $1\sim 3\ \mu\text{M}$ の $\text{PO}_4\text{-P}$ が5月から8月の間にある間隔で“パルス”的に供給される (Fujita *et al.*, 1989)。また、グアノの投棄による不定期の $\text{NH}_4\text{-N}$ の供給もあるので、年間を通じ栄養塩が枯渇する期間は極めて短い。同地や近傍の Boiler Bay に生育するアオサ類 *Ulva* spp., 紅藻アマノリ類 *Porphyra* sp., ヒバマタ目の *Pelvetiopsis limitata* などでは、時折窒素もしくはリン制限が認められるものの厳しいものではない (Wheeler and Björnsäter, 1992), と結論づけられている。

亜寒帯・温帯域では冬季は栄養塩レベルが高い一方で、日射量や水温条件が海藻類の成長を制限する場合もある (Anderson *et al.*, 1981; Novacek, 1984)。多くの海藻類の一次生産に対する窒素制限は、春季以降に光や水温条件が好転し、藻体が活発に成長することにも起因するようである (Lapointe and Tenore, 1981; Rosenberg and Ramus, 1982; Asare and Harlin, 1983; Rosenberg *et al.*, 1984)。

2.2. 富栄養化の進行した温帯沿岸域

温帯域の閉鎖性の高い内海・内湾域で、陸域からの負荷により富栄養化が進行した場所では、アオサ目 Ulvales など緑藻類の異常増殖によるグリーンタイドが起こる (大野, 1999)。

アオサ類によるグリーンタイドの報告は地中海で多く、同沿岸域に分布する極めて閉鎖性の高い潟湖 (lagoon) では、湿重量で最大 $10\ \text{kg}/\text{m}^2$, 年間平均 $5\ \text{kg}/\text{m}^2$ を越えることもある (Sfriso and Marcomini, 1997)。フランスの Thau Lagoon の DIN 濃度は年間を通じて $10.5\sim 247.9\ \mu\text{M}$ と変動し、平均で $50\ \mu\text{M}$ 以上と極めて高い。また、リンは $0\sim 12\ \mu\text{M}$ の範囲で変動し、春季の一時期のみ低レベルとなりアオサの成長を制限するが、その後の現存量の増加には影響しない (De Casabianca and Posada, 1998)。Sfriso らは、イタリアの Venice Lagoon 内の複数の場所で、繰り返しアオサの生産量を調査している。それによると、同地のアオサの成長は、栄養塩レベルの高い場合 (DIN の年間平均濃度が $34\sim 51\ \mu\text{M}$) では主には光量や水温に制限されているのに対し、比較的低い場合 (同じく $13\sim 17\ \mu\text{M}$) では春季から夏季の成長期に窒素

による制限を受けている (Sfriso, 1995; Sfriso and Marcomini, 1997)。これらの海域では、DIN のうちでも $\text{NH}_4\text{-N}$ が卓越すること、栄養塩濃度が周年を通して比較的高濃度に維持され、季節変動が不明瞭であること (Fig. 1b) が特徴である。また、海底に堆積した藻体の分解やそれに伴う底質の還元化により、再生する栄養塩の影響も大きい (Lavery and McComb, 1991a; De Casabianca and Posada, 1998)。

富栄養化した海域では、アオサ類だけではなく、シオグサ類 *Cladophora* など他の緑藻類や、オゴノリ類 *Gracilaria* など紅藻の異常増殖も見られる。米国・マサチューセッツ州の Waquiot Bay では生活廃水の流入により富栄養化が進行し海藻類の異常増殖が見られるが、オオバアオサ *Ulva lactuca* は現存量にして 1% 以下であり、シオグサ類やオゴノリ類がほとんどを占める。同海域の 2~10 月の DIN 濃度は $4\sim 16\ \mu\text{M}$ の範囲で変動し、夏季に低レベルになる。アオサは夏季に窒素制限を示すとともに、高温によるストレスや光合成低下により減少する。シオグサ類やオゴノリ類は、高温耐性や体内の窒素貯留能などでアオサに勝り、卓越する (Rivers and Peckol, 1995)。

オーストラリアの Peel-Harvey Estuarine System では、1960 年代に集水域の農業開発が進行したこと、また、同時期に降雨量が多かったことなどから、富栄養化が起こり、シオグサ類 *Cladophora montagneana* の大増殖が起こった (Lavery *et al.*, 1991)。同地では DIN が $3.4\sim 164\ \mu\text{M}$ 、DIP が $0.65\sim 4.8\ \mu\text{M}$ の範囲で変動したが、栄養塩の流入は冬季に集中しており、シオグサの成長は夏季にはリン制限であった (Birch *et al.*, 1981)。また、同地ではその後、嵐による逸散と直後の植物プランクトンの増殖の影響によりシオグサは減少し、アオサ類と同じく緑藻類のジュズモ類 *Chaetomorpha* に主要種が交代した (Lavery and McComb, 1991b)。

米国の北東岸では外来種である緑藻類のミル *Codium fragile* が繁殖している。ミルの季節消長は基本的に水温と光量に制御されているが、夏季の成長は窒素制限であり、ロードアイランド州沿岸では富栄養化の進行とともに本種の分布が拡大している (Hanisak, 1979a, b)。同州の 3 生育地における DIN 濃度は、 $2\ \mu\text{M}$ 以下から $9\sim 18\ \mu\text{M}$ 程度まで変動し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が高い (Hanisak, 1979a)。

日本においても、東京湾、三河湾、瀬戸内海など、沿岸開発の進行した内湾域を中心にアオサ類によるグリーンタイドが起きている (大野, 1999)。我が国で最も早くグリーンタイドが報告された鹿児島県の出水干拓地先では、平均 DIN 濃度で約 $11\sim 36\ \mu\text{M}$ 、DIP

濃度では $0.8\sim 1.4\ \mu\text{M}$ が認められ、人為的な富栄養化がアオサ類の増殖の原因と結論付けられている (新村・武田, 1979; 新村, 1979)。また、グリーンタイドが起きている横浜市海の公園とその近傍では、DIN は $5\sim 65\ \mu\text{M}$ 程度、DIP で $0.3\sim 2.4\ \mu\text{M}$ 程度の範囲で季節変動を示すが、ほぼ周年にわたりそれぞれ $10\ \mu\text{M}$ 以上、 $0.5\ \mu\text{M}$ 以上の濃度が見られている (工藤, 1999)。同じく、高知県浦の内湾では $\text{NH}_4\text{-N}$ の卓越する DIN が $1\sim 5\ \mu\text{M}$ 以上、DIP が $0.3\sim 2.6\ \mu\text{M}$ の範囲で変動する (大野, 1988)。同地では DIP 濃度と比較し DIN 濃度はそれほど高レベルではないが、その季節変動は不明瞭であり、グリーンタイドが生じる海域の栄養塩環境の特性を有している。

2.3. 熱帯・亜熱帯海域

熱帯海域では一般的に海藻類に対する植食性魚類やウニ類による食圧が高く、藻場に代わってサンゴ礁が発達する。また、海水中の栄養塩濃度は周年を通じて極めて低いか検出限界以下である (Fig. 1c)。海藻類と栄養塩の関係について多くの報告がなされているハワイの Kane'ohe Bay や北西大西洋の熱帯海域では、通常 DIN 濃度で $1.0\ \mu\text{M}$ 、DIP 濃度で $0.1\ \mu\text{M}$ を越えることは少ない (e.g. Delgado and Lapointe, 1994; Lapointe *et al.*, 1987, 1992a; Larned and Stimson, 1996; Littler *et al.*, 1991; Schaffelke and Klumpp, 1998a)。熱帯海域の海藻類は常に強度の栄養塩不足にあり、栄養塩の添加により光合成や成長が著しく増加するなど生産力の増加が見られる (Delgado and Lapointe, 1994; Lapointe, 1986, 1989, 1995; Schaffelke and Klumpp, 1997, 1998b)。

海藻類の生産を制限している栄養塩は、海域により異なっている。Kane'ohe Bay では海藻類の成長は主に窒素制限を受けている (Larned, 1998; Stimson *et al.*, 1996) が、大西洋域の米国・フロリダ州沿岸やカリブ海沿岸、インド洋西部の Seychells 群島では、窒素よりもリンが一次生産の主要な制限要因となっている (Lapointe, 1986, 1987, 1989; Lapointe and O'Connell, 1989; Lapointe *et al.*, 1992a, b; Littler *et al.*, 1991)。これらの熱帯域に多い環礁島では、死んだサンゴや石灰藻類の碎片により底質が構成されており、海水中に溶存している反応性リンが吸着し、DIP 濃度は低くなる (Lapointe *et al.*, 1992a; Littler *et al.*, 1991)。このような海域に生育している海藻類では、栄養塩類が豊富な海域に生育するものと比較し、有機態のリン酸塩を加水分解する酵素、アルカリ性ホスファターゼの活性が高く (Lapointe, 1989;

Lapointe and O'Connell, 1989 ; Lapointe *et al.*, 1992a), DIPが常に不足していることを裏付けている。

一方、前述の Seychells 群島では、環礁島だけでなく標高の高い花崗岩質の島もあり、ここでは人口・降雨量ともに多いため栄養塩の流入も多く、ホンダワラ類を中心とする藻場が発達している。Great Barrier reef に生育するホンダワラ類は雨季に陸域から“パルス”的に供給される栄養塩により生産力が維持されている (Schaffelke and Klumpp, 1998b)。また、熱帯地方に多いマングローブ域 (Lapointe *et al.*, 1987) や、魚食性鳥類の営巣場の近傍 (Lapointe *et al.*, 1992b ; Littler *et al.*, 1991) では、落葉や糞 (ゲアノ) 由来の栄養塩が豊富であり、周縁部に生育する海藻類の栄養塩制限の程度は低い。さらに、遮蔽されたリーフ内部の堆積物中の間隙水 (Larned, 1998) や流入地下水 (Lapointe, 1997) は海水に比べ栄養塩濃度が高く、このような場所に生育するイワズタ類などの海藻類の生産力の維持に貢献している。より微細なレベルでは、Kane'ohe Bay に生育する緑藻キッコウグサ *Dictyosphaeria cavernosa* は、サンゴを覆うように生育して藻体との間に空間を作り、溜まった沈積物や棲みこむ動物の排泄物由来の栄養塩を利用する (Larned and Stimson, 1996 ; Stimson *et al.*, 1996)。また熱帯域のホンダワラ類は葉上に沈積する浮泥から栄養塩を吸収している (Schaffelke, 1999)。このように熱帯海域では、様々なスケールで偏在する栄養塩が、海藻類の生産に重要な役割を果たしている。

近年、熱帯海域の各地沿岸で急速なサンゴ礁から海藻藻場へのシフトが進行している。これについては植食動物の減少による top down control の低下だけでなく、富栄養化による bottom up control の影響も大きい (Lapointe, 1997 ; Lapointe *et al.*, 1997)。Littler らや Lapointe らは、植食動物 (主には魚類) による食圧と栄養塩濃度のレベルにより、熱帯・亜熱帯海域の沿岸生態系を説明する模式図を提示している (Fig. 2)。すなわち、一般的に熱帯海域は高食圧、低栄養塩の環境でありサンゴが優占するが、食圧が高いままで栄養塩レベルが上昇するとサンゴから石灰藻へと優占する生物は変化し、食圧が低下し栄養塩が増加すると葉状部を形成する海藻類が優占ようになる (Littler *et al.*, 1991 ; Lapointe, 1997 ; Lapointe *et al.*, 1997)。食圧の低下と栄養塩レベルの上昇は、ともに魚類の乱獲と陸域の開発という人為的なものであり、人間活動が熱帯・亜熱帯海域の沿岸生態系に与える影響は極めて大きいと考えられている。

北西大西洋の熱帯海域では、富栄養化によるサンゴ礁から海藻藻場へシフトする栄養塩レベルの閾値

は、DIN および DIP でそれぞれ $1.0 \mu\text{M}$, $0.1 \mu\text{M}$ とされているが、海藻類の繁茂が見られる場所ではそれを大幅に上回る濃度が検出されている (Lapointe *et al.*, 1992b ; Lapointe, 1997)。サンゴ礁からホンダワラ類による藻場へと沿岸生態系が大きく変化しつつある台湾南部では、年間の平均 DIN, DIP 濃度はそれぞれ 8.86 , $0.39 \mu\text{M}$ であり (Hwang *et al.*, 2004), 富栄養化した温帯域沿岸に匹敵する栄養塩濃度が認められている。

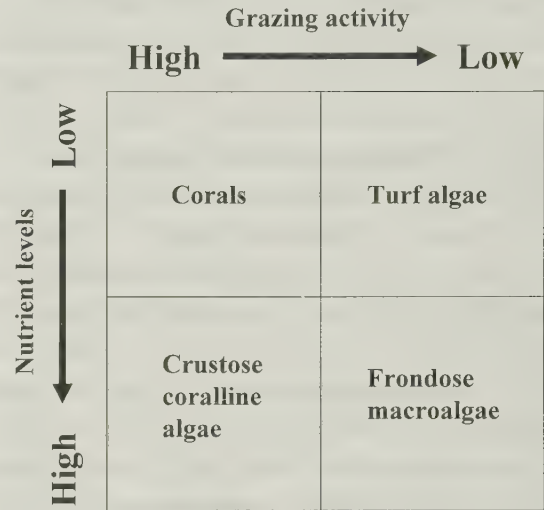


Fig. 2. Diagrams illustrating the relative dominance of major space-occupying primary producers on tropical and subtropical reef areas from Littler *et al.* (1991) and Lapointe (1997).

第3章 海藻類の栄養塩吸収・貯留能と一次生産における「適正栄養塩」レベル

前章でレビューしたように、海域または生育地によりその栄養塩環境も様々であり、そこに生育する海藻類の一次生産が著しい栄養塩制限を受けている場合もある。しかし、海藻類の季節消長と栄養塩濃度の変化は必ずしも直結しない場合も多い。また、海水中の栄養塩濃度が低い場合にあっても、極めて高い生産力が維持される場合も少なくない。

海藻類には低濃度の栄養塩を効率よく吸収する能力や、沿岸湧昇や降雨時の陸水流入など、不定期に供給される栄養塩を効率的に吸収し利用する能力がある。また、多くの海藻類は、余剰の窒素やリンを体内に大量に貯留し、栄養塩レベルが低下したときに利用することも出来る。このような栄養塩の吸収・貯留能は海藻類の一次生産の維持において極めて重要な意義を有

しており、本章では関連する既往知見の整理を行う。また、貯留も含めた海藻類の栄養状態を示す指標として、藻体内の窒素・リン含有量が多く、生理生態学的な研究で用いられているので、本章では海藻類の窒素・リン含量が示す情報とその活用についても既往知見の整理を行うとともに、海藻類の一次生産における「適正栄養塩」レベルに言及した事例も紹介する。

3.1. 栄養塩吸収に関わる諸要因

海藻類の栄養塩吸収の基本的な機構は植物プランクトンと同様である。しかし、水塊とともに移動する植物プランクトンとは異なり、海藻類は岩礁などの基質に固着し、海水はその周囲を動く。したがって、藻体への栄養塩の供給は海水中の濃度と流動とを併せたフラックスとなり、栄養塩が比較的低濃度でも海水流動が十分であれば、生理的必要量を満たすことができる可能性がある。本節では、海藻類の栄養塩吸収における海水流動の作用について、その機構に関する知見を紹介する。

また、単細胞性の植物プランクトンと異なり、海藻類の形態は、薄い膜状や糸状、殻状のものから複雑に分化した器官を有するものまで、種により極めて多様である。海藻類の形態は、その種の有する様々な生理特性、さらにはそれに基づいた生態的な戦略と密接に関連している。したがって、形態に注目した機能形 (functional form) に基づいて海藻類を分類することにより、その生理生態特性と生育に適した環境 (栄養塩環境を含む) を類型化することが可能である。本節では、海藻類の栄養塩吸収能の比較、特に機能形による分類に基づく比較を中心に、海藻類の栄養塩吸収特性について関連知見を概説する。

3.1.1. 海水流動

海水流動は、栄養塩や光合成に必要な無機炭酸塩が、海水から藻体表面へ供給される過程に影響を及ぼし、海藻類の生産力の維持において極めて重要である。その機構は流体力学の範疇であり、Hurd (2000) の総説に詳しい。海水流動には、波浪による振動流や、潮汐流など一方方向の流れなどがあるが、いずれにせよ、海藻はその藻体構造や形態により、わずかな海水の動きを最大限に利用している。

海水が海底面や海藻体などの物体に沿って流れるとき、海水分子と物体の分子が接触する物体表面では流速は理論上ゼロとなり (滑り無し条件)、物体の影響が及ばない領域での流れ (主流 main stream) との間に速度勾配を生じる (Fig. 3)。このような主流

と物体表面の間に出来た流速の勾配層を流速境界層 (velocity boundary layer) と呼ぶ。物体表面のごく近傍では流れが非常に遅く、粘性が支配的で、垂直方向の速度成分がない層流の状態 (laminar) が維持される。このような物体表面に極めて近い層を粘性底層 (viscous sub-layer) と呼び、Fig. 3に示すように物体の上流部では流速境界層は粘性底層により占められる。層流状態の流速境界層の中では、藻体による栄養塩分子の吸収が行われてその密度が減少する一方、主流側から新たな供給が行われて、分子密度の勾配が生じる。この分子密度の勾配層を拡散境界層 (diffusion boundary layer) と呼び、この層を通じた栄養塩分子の移動が藻体への栄養塩供給を律し、ひいては一次生産の制限要因となりうる (Hurd, 2000)。

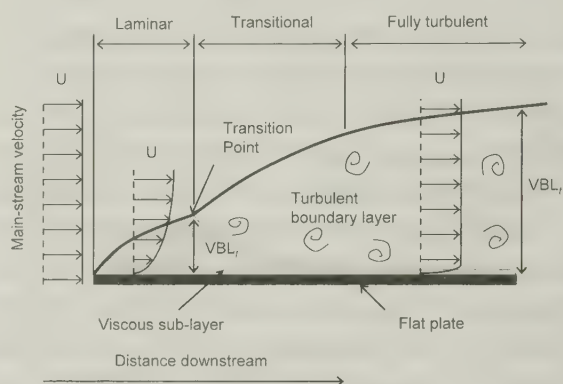


Fig. 3. Schematic of the velocity boundary layer (VBL) and vertical velocity profiles (u) along a smooth flat plate (from Hurd 2000).

流速境界層は、藻体の上流端部から発達し、下流方向にその厚さを増していく。しかし、厚さの増加に伴い、この流速境界層の中で層流状態であった流れは乱れ、さらに乱れが大きくなるとランダムに動く無数の渦流ができる (Fig. 3)。この乱流境界層 (turbulent boundary layer) の形成は、流れが藻体に沿う距離だけでなく、主流の流速が大きい程促進される。乱流境界層の形成後も、藻体表面の直近では粘性底層が維持されるが、その厚さは薄くなり、乱流境界層内の渦流により主流側から海水が直接供給されるようになるので、拡散境界層が薄くなるのと同じ結果になる。したがって、海藻体に栄養塩が十分に供給されるためには、海水中の栄養塩濃度が高いことに加え、主流の流速がある大きさに維持され、藻体の周囲に乱流境界層が形成される (拡散境界層が薄くなる) ことが必要である (Fujita and Goldman, 1985; Larned and

Atkinson, 1997; Hurd, 2000)。

ジャイアントケルプ *Macrocystis* sp. では拡散境界層の厚みが理論的に求められており、主流の流速が1cm/s 以下の場合、その厚みは400~700 μ m であるが、流速が10cm/s 以上になると流速の影響は飽和し、拡散境界層は50~150 μ m 程度になる (Wheeler, 1980; Hurd *et al.*, 1996; Hurd, 2000)。より小型で分枝の多いオゴノリ類 *Gracilaria* sp. などでは、さらに拡散境界層は薄くなる (Hurd, 2000)。また、これらの“理論値”は、海藻体の表面が平滑なものであるとして求められているが、実際は波状の縮れや突起物などを有するためその表面形状はより複雑で、これらの効果により、より小さい流速で乱流境界層が形成されるようになる (Hurd, 2000)。コンブ科 *Laminariales* の海藻では、1~3cm/s の流速で、流速境界層が層流状態から乱流状態へ遷移することが、海水流動の視覚化技術により明らかになっている (Hurd and Stevens, 1997; Hurd, 2000)。

実験的に海藻類の光合成や栄養塩吸収と水流との関係を調べた例では、ジャイアントケルプ *Macrocystis pyrifera* (Wheeler, 1980) や、スサビノサ *Porphyra yezoensis* (高ら, 1992) の光合成がそれぞれ4cm/s, 3cm/s 以上の流速で飽和した。また、オオバアオサ *Ulva lactuca* やオゴノリ類 *Gracilaria tikvahiae* の成長は7.5cm/s で飽和し (Parker, 1981, 1982), ジャイアントケルプの $\text{NO}_3\text{-N}$ 吸収は2.5cm/s で飽和した (Gerard, 1982b)。これらの研究に基づけば、一般的に海藻類の成長にとって10cm/s 程度までの流速があれば十分と考えられる (Hurd, 2000)。

流動不足により海藻の一次生産が制限されているかどうか明らかにするためには、生育地における実測が必要である。Wheeler (1980) は、ジャイアントケルプの群落内ではしばしば流動が生産の制限要因となっていると推測したが、Gerard (1982b) は、天然の藻体にボタン状の石膏塊を取り付け、その溶出から藻体表面の海水流動を把握した。その結果、生育地の藻体表面の海水流動は、栄養塩吸収が飽和する2.5cm/s より常に大きかった。一般的に、海藻は付着器で海底に固着する一方藻体自体は中層に保たれるため、小さな海水流動に対しても、“はためき (flapping)” 効果により藻体表面の流動を高めることが出来る (Norton, 1982; Koehl and Alberte, 1988)。また、栄養塩濃度の極めて低いハワイ・Kane'ohe Bay に生育する緑藻キッコウグサ *Dictyosphaeria cavernosa* では、成長に関わる栄養塩フラックスのモデルが構築された。このモデルより、生育地の実際の成長率を維持するために、窒素吸収においては5cm/s 以上、リン吸収において

は1cm/s 以上の流動が必要であると試算されたが、生育地では10cm/s の流動が実測された (Larned and Atkinson, 1997)。

栄養塩濃度の低い海域や時期などに、底泥や葉上の堆泥、また、コケムシ類などの固着動物の排泄物から再生した栄養塩が利用される場合 (Hurd *et al.*, 1994; Larned and Stimson, 1996; Stimson *et al.*, 1996; Schaffelke, 1999) では、栄養塩供給における海水流動の役割は小さくなる。その場合、逆に拡散境界層の存在により、アルカリ性ホスファターゼなどの細胞外酵素が滞留し、より効率的に栄養塩を利用できると考えられている (Schaffelke, 1999; Hurd, 2000)。

3.1.2. 海藻類の栄養塩吸収の一般特性

藻体表面に達した栄養塩の藻体内への吸収は、その栄養塩イオンの種類ごとに特異的な、エネルギーを必要とする細胞膜上の透過酵素系によって行われるとされている。多くの種においてその生育時期の自然水温の変動範囲内で吸収実験を行うと、比較的高温側で吸収速度が大きいこと (Harlin and Craigie, 1978; Topinka, 1978; 山本・高尾, 1988), また、栄養塩吸収は明条件下で促進される (Haines and Wheeler, 1978; Harlin and Craigie, 1978) などの事実は、上記のことを裏付けている。

海藻類の栄養塩の吸収速度と栄養塩濃度の間には、一般的に Michaelis-Menten 式 (もしくは Monod の式、ただし通常 Monod 式は栄養塩濃度と成長速度の関係を表現する場合に用いられる) で表現される双曲線型の関係があり、ある濃度下で吸収速度は飽和する。海藻が示す最大吸収速度 V_m の大きさは高濃度下での栄養塩の吸収能力を示し、また、 V_m の50% の吸収速度を与える栄養塩濃度 K_s (半飽和定数) は低濃度下の吸収能を示すとされ、ともにその種の栄養塩環境への適応度や他種との競合力を示す生理的パラメータとして使用されている。 K_s 値については、低い値を示す種ほど低濃度の栄養塩を効率よく吸収できるとされているが、 K_s 値の大小は実際には V_m 値の大小にも影響を受けるため、双曲線の初期の直線部の傾きの大きさを示す V_m/K_s 値の方が、低濃度下の吸収能をよく表現している (Healey, 1980)。さらに、 V_m/K_s 値に代わり、生育地で実際に起こりうる栄養塩濃度下の吸収速度を算出し、種間比較を行う場合もある (Wallentinus, 1984; Hurd and Dring, 1990)。

栄養塩の中でも $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収については、ジャイアントケルプ (Haines and Wheeler, 1978) や紅

藻の *Neogardhiella baileyi*, オゴノリ類 *Gracilaria foliifera* (D'Elia and DeBoer, 1978) など多くの種では高濃度下でも飽和せず、濃度の上昇に伴い吸収速度も上昇する「拡散型」の吸収を示す。このような拡散型の吸収は、特に栄養塩が欠乏しがちな環境では、動物類の排泄などにより突発的に供給された $\text{NH}_4\text{-N}$ を効率よく捕捉するのに適しており (D'Elia and DeBoer, 1978), 生態的な意義があると考えられている。

多くの海藻類は $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ を同時に吸収することが出来る (Bird, 1976; Haines and Wheeler, 1978; Topinka, 1978; 町口ら, 1985)。しかし, $\text{NO}_3\text{-N}$ は吸収された後に関連酵素により $\text{NH}_4\text{-N}$ まで還元されなければならず, 同化されるまでに必要なエネルギーや律速する途中過程が多い (Thomas and Harrison, 1985; Hernández *et al.*, 1993a; Larned and Stimson, 1996)。多くの海藻類では $\text{NH}_4\text{-N}$ の方が $\text{NO}_3\text{-N}$ よりも速やかに吸収され (Haines and Wheeler, 1978; Ryther *et al.*, 1981/1982), ミル (Hanisak and Harlin, 1978) や紅藻 *Neogardhiella baileyi*, オゴノリ類 *Gracilaria foliifera* (D'Elia and DeBoer, 1978) のように高濃度の $\text{NH}_4\text{-N}$ の存在により $\text{NO}_3\text{-N}$ の吸収が阻害される場合もある。一方で, 紅藻のアマノリ類 (Thomas and Harrison, 1985) や褐藻のコンブ類 (Harlin and Craigie, 1978), ヒバマタ類 (Topinka, 1978) などでは $\text{NH}_4\text{-N}$ の存在により $\text{NO}_3\text{-N}$ の吸収はほとんど影響を受けないとされ, 種により反応性が異なるようである。同様のことは成長に対しても言え, $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ のそれぞれを窒素源とした場合, 紅藻 *Neogardhiella baileyi*, オゴノリ類 *Gracilaria foliifera* では $\text{NH}_4\text{-N}$ の方が成長に好ましく (DeBoer *et al.*, 1978), 褐藻類のヒバマタでは両 DIN 下で成長に大きな差は無かった (Topinka and Robbins, 1976)。また, 海水中に大量に存在する有機態窒素・リンについても, 多くの海藻類は吸収・利用が可能である (Hanisak, 1983; Tarutani *et al.*, 2004; Hernández *et al.*, 1993b)。しかし, 尿素を与えた場合, ナガマツモ (Probyn and Chapman, 1983) やミル (Hanisak, 1979a) で DIN を与えられたときとほぼ同様の成長を示すとする報告がある一方, 種によっては DIN と比較して大きく成長が劣る (DeBoer *et al.*, 1978), もしくはほとんど成長に寄与しない (Larned and Stimson, 1996) とする報告もあり, 有機態栄養塩の利用能についても種により多様なようである。

栄養塩の吸収能は, 同種間でもその個体の栄養塩履歴や生理状態などにより大きく変動する。アオサ,

アオノリ, オゴノリ類などでは, 窒素制限下にある藻体は窒素充足した藻体よりも速やかに $\text{NH}_4\text{-N}$ を吸収する (D'Elia and DeBoer, 1978; Fujita, 1985)。また, 冠水時にしか栄養塩を吸収出来ない潮間帯の海藻類は, 干出した後栄養塩吸収能が増加することが知られている (Thomas and Turpin, 1980; Thomas *et al.*, 1987)。北アイルランドの潮間帯で帯状分布するヒバマタ類 3 種について, $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度 $1\text{ }\mu\text{M}$ の下で吸収能を比較したところ, 潮間帯の高い位置に群落を作り冠水時間の短い種ほど高い吸収速度を示した (Hurd and Dring, 1990)。ヒバマタ類は側糸 (hyaline hair) を形成し, 表面積を大きくすることにより栄養塩吸収能を高めたり (Hurd *et al.*, 1993), また暗期下でも明期下と同じ速度で $\text{NO}_3\text{-N}$ を吸収することができる (Topinka, 1978) など, 冠水時間の短い潮間帯での生育に適応した性質を有している。

同種でも年齢や生育環境によって, 栄養塩吸収能は変化する。コンブ類 *L. groenlandica* の幼体 (0 齢) は, 成体 (1~2 齢) と比較し, 3 倍の速度で $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ を吸収する (Harrison *et al.*, 1986)。栄養塩環境に勾配のある Nova Scotia 沿岸に生育するコンブ類 *L. longicruris* では, 貧栄養の場所に生育する個体は, 栄養塩の豊富な場所に生育する個体と比較し, $\text{NO}_3\text{-N}$ 吸収に関して高い V_m 値を有していた (Espinoza and Chapman, 1983)。日本海・京都府沿岸のホンダワラ類では, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 吸収能は種間で大きく異なるだけでなく, ヨレモク *S. siliquastrum* では生育地間でも大きく異なっており, 前述の *L. longicruris* とは逆に富栄養化の進んでいる場所の個体が最も速い吸収速度を示した (西垣ら, 2004)。このような生育地間で見られる生理特性の違いは, 遺伝的な分化に基づいている (Espinoza and Chapman, 1983) 場合がある。

3.1.3. 種の「機能形」と栄養塩吸収能

前述のように, 海藻類は同種でも生理状態や生育環境で栄養塩吸収能が大きく変動する。しかし, 第2章でレビューしたように, 栄養塩環境の勾配もしくは変化に伴い海藻植生が大きく変化する可能性がある。したがって, 海藻植生と栄養塩環境との間には密接な関連があると考えられ, 植生を構成する主要種の栄養塩吸収・利用特性を整理・類型化することにより, その生育する栄養塩環境の理解に資することが出来ると考えられる。

海藻類は膜状, 糸状の単純な形態の種から, 多様な組織や器官を分化させた複雑な形態の種まで多様であり, その多様性は緑藻・褐藻・紅藻を問わず, それぞれの系統内で並行的に見られる。栄養塩の吸収は藻体

の表面で行われるので、概して体積に比して表面積の大きい形態の種の方が栄養塩吸収において有利であり、形態の違いは栄養塩吸収能の違いにも反映していると考えられる。

Littler and Littler (1980) らは、海藻類の形態や内部構造は、その種の生理生態的特性と密接に関連し、多様な生育環境下における適応過程で進化してきたものとして論じている。彼らは、海藻類を系統や生活史、生育場所などにより分類した従来の生活形 (life form) の概念に変わり、形態や藻体の内部構造をより重視した機能形 (functional form) の概念を提唱し、次の6群に分類している (Littler and Arnold, 1982; Littler *et al.*, 1983)。I) 膜状グループ (Sheet-group); 1層から2層の薄い細胞層からなる膜状の形態の種。アオサ・アオノリ属やアマノリ属など。II) 糸状グループ (Filamentous-group); 単列から多列の細胞からなる糸状体もしくは糸状体が細かく分枝した形態の種。イワズタ属、ジュズモ属、イギス属など。III) 分枝グループ (Coarsely-branched-group); 皮層・髄層に分かれた細胞層からなる直立した分枝状の形態を有する種。藻体は比較的肉厚で強い。テングサ属、ソゾ属など。IV) 革状グループ (Thick-leathery-group); 皮層細胞層が発達し、藻体は分厚く強度がある。複雑に分化した組織や器官を有している。コンブ類やホンダワラ類などの大型褐藻類が含まれる。V) 有節石灰藻グループ (Jointed-calcareous-group); 石灰質に覆われた有節の直立した藻体を有する種。サボテングサ属、サンゴモ属など。VI) 殻状グループ (Crustose-group); 岩礁や他生物の表面に着生する匍匐状や殻状の藻体を有する種。無節の石灰藻やイワノカワ属など (Fig. 4)。

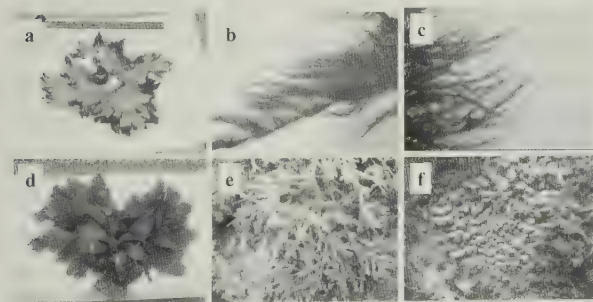


Fig. 4. Macroalgal functional forms by Littler *et al.* (1983). a; *Ulva pertusa* (I. Sheet-group), b; *Ectocarpus* sp. (II. Filamentous-group), c; *Lomentaria hakodatensis* (III. Coarsely branched-group), d; *Ecklonia kurome* (IV. Thick leathery-group), e; *Marginisporum crassissimum* (V. Jointed-calcareous-group), f; *Yamadaea melobesioides* (VI. Crustose-group).

機能形の分類に基づいて北米南西岸の62種の海藻の単位藻体重あたりの光合成を比較した結果 (Fig. 5a) では、グループ I が平均 5.16 mgC/g/h と最も高く、最も低いグループ VI の 0.07 mgC/g/h まで、グループの順位に準じた生産力の差異が見られた (Littler and Arnold, 1982)。特に I, II のグループの藻体は柔らかく薄い、藻体体積に対する表面積が大きく光受容や栄養塩吸収に有利であり、また藻体における光合成を行う細胞の割合も大きい。成長は極めて早い、藻体に物理的強度が無く植食動物にも食われやすい。一般的に短命で大量の生殖細胞を放出し、環境が好転したときに爆発的に増殖する opportunistic な特性を有している。一方、藻体の形態・体制が複雑なグループほど、単位藻体重あたりの光合成量が小さい代わりに、固い藻体や化学的防御機構を獲得しており、物理的攪乱や植食動物の摂食に対し耐性を有している。前者のグループと比較し成長は遅いが長命で、植生遷移の後期に出てくる種が多い (Littler and Littler, 1980; Littler and Arnold, 1982; Littler *et al.*, 1983)。

Wallentinus (1984) は、バルト海沿岸に出現する

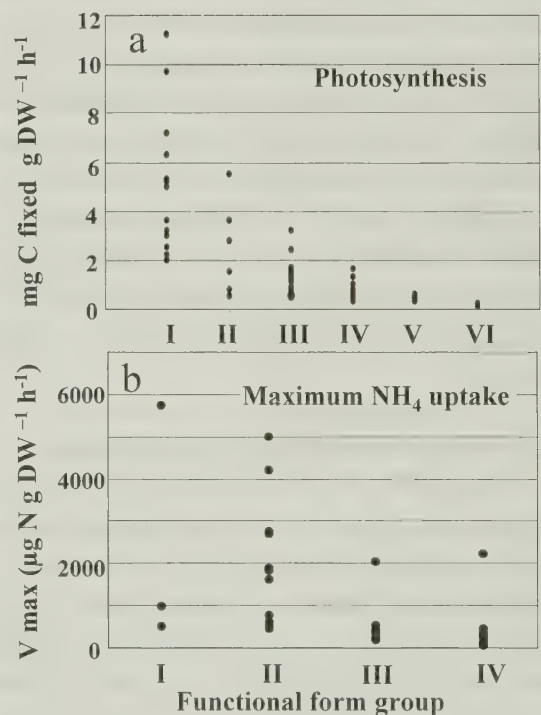


Fig. 5. Photosynthesis of 62 species and the maximum NH_4 uptake rate of 31 species categorized into Group I to VI by Littler and Arnold (1982). Data from Littler and Arnold (1982) and Wallentinus (1984) are utilized.

海藻類を Littler ら (1983) の機能形 (石灰藻・殻状グループを除く) に基づいて分類し、既往文献と新規実験結果から栄養塩吸収能を比較した。栄養塩吸収のパラメータは同じ機能形グループ内、場合によっては同種内でも極めて変動が大きかったが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収の V_m 値については、グループ I で $515\sim 5731\ \mu\text{gN/gDW/h}$ 、グループ II で $454\sim 4989\ \mu\text{gN/gDW/h}$ 、グループ III で $182\sim 2031\ \mu\text{gN/gDW/h}$ 、グループ IV で $40\sim 2209\ \mu\text{gN/gDW/h}$ とグループの順位に伴い低下する傾向が認められた (Fig. 5b)。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 吸収においても同様の傾向が見られ、前出のグループほど高濃度の栄養塩が供給されたときに迅速に吸収する能力が高い傾向が見られた。また、 V_m/K_s 値についても前出のグループの方が高い数値を示し、低濃度下でも栄養塩をめぐる競合で後出のグループより優位にあることが示唆された (Wallentinus, 1984)。

Rosenberg ら (1984) は、ナガマツモ (グループ III; Wallentinus, 1984) と多年生のヒバマタ類 *Fucus distichus* (グループ IV) で夏季の $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸収能を比較した。1 年生のナガマツモは、多年生のヒバマタと比較して高い成長率を示し、 V_m 値、 V_m/K_s 値についても 2～3 倍大きい値を示した。ナガマツモは、栄養塩濃度の低い春季から夏季に発芽・成長しなければならず、低濃度の栄養塩を効率的に吸収するとともに、動物の排泄などによる栄養塩の高濃度の「パルス」も利用するなど、短期間で大きく変動する栄養塩環境に適応している。一方、ヒバマタは冬季にはほとんど成長せず藻体内に栄養塩を貯留し、春季以降に活用することが出来る。ヒバマタは、吸収した栄養塩を即成長に回さなければならないナガマツモと比較し、より長期の栄養塩の変動に適応しているといえる。栄養塩の藻体内貯留能は生態学的に極めて重要であり、次節で概説する。

3.2. 栄養塩の藻体内貯留とその生態学的意義

海藻類は体内に吸収した栄養塩を新組織の形成に用いるとともに、余剰の栄養塩を貯留し、海水中の栄養塩が欠乏した際に活用する。吸収した栄養塩をどのような物質として貯留するか、また、貯留した栄養塩に依存して成長を継続できる期間などは、種により異なっている。

海藻類の栄養塩の貯留に機能している物質としては、窒素の場合、無機態窒素そのもの、遊離アミノ酸 (大房ら, 1977)、また、光合成色素であるフィコエリスリンなどのフィコビルリン蛋白質 (Bird *et al.*, 1982) などが知られる。リンについては、紅藻ツノマ

タ *Chondrus crispus* で水溶性の有機態リン等の形で貯留されている (Chopin *et al.*, 1989) という報告があるが、研究例が未だ少ないようである。

コンブ類の夏季の成長は窒素制限を受けているが、冬季以降に栄養塩環境が好転すると成長率が増加するとともに、藻体内には大量の窒素が無機態のまま貯留される (Chapman and Craigie, 1977; Asare and Harlin, 1983; Mizuta *et al.*, 1992)。カナダのコンブ類 *L. longicruris* は春季はじめに $\text{NO}_3\text{-N}$ を最大で $150\ \mu\text{moles/gWW}$ 、海水中の濃度の 28,000 倍を体内水中に濃縮しており、 $\text{NO}_3\text{-N}$ だけで藻体の総窒素含量の 1/3 を占める (Chapman and Craigie, 1977)。また、藻体にはアミノ酸も貯留されており、春季に海水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ が枯渇した後も、コンブ類は体内に貯留した無機態・有機態の窒素を利用しながら極めて高い成長率を 2 カ月程度維持する (Chapman and Craigie, 1977; Mizuta *et al.*, 1992)。この冬季における貯留 $\text{NO}_3\text{-N}$ の形成は、同時期の栄養塩環境の好転とは逆に日射量の低下が光合成の制限要因となり、炭素同化物との供給のバランスが崩れるためとも考えられる (Chapman *et al.*, 1978)。また、2 カ月という貯留窒素に依存した成長期間は、動物や微生物による栄養塩再生を通じた窒素供給 (Gerard, 1982a) や「末枯れ」部からの窒素のリサイクル (町口ら, 1985; Mizuta *et al.*, 1994) を考慮に入れていない過大評価であることも示唆されている。しかし、この窒素貯留能がコンブ類の春季の成長を維持し、高い年間生産力を支える上で大きく貢献していることは間違いない。

Gerard (1982a) は、DIN が最大 $3\ \mu\text{M}$ 以上の沿岸域から、 $1\ \mu\text{M}$ 以下の沖合域にジャイアントケルプ *Macrocystis pyrifera* を移植し、その成長と藻体の窒素含量を追跡した。成長率は、移植後 2 週間は沿岸域より若干低い程度で維持されたが、3 週間目に急落し、また、その期間に葉状部の窒素含量は 2.2～3.5% 乾重から 0.8～1.2% 乾重まで減少した。この結果より、移植前の藻体内窒素の 58% が、貯留窒素として貧栄養下での新組織の形成に用いられたとしている。また、天然の *M. pyrifera* が、最大 3～4% の窒素を有していることから、3 週間程度は貯留窒素に依存して成長が継続できるものと推測された。*M. pyrifera* では、藻体内の総窒素含量の 8～10% に寄与する遊離アミノ酸 (Gerard, 1982a; Zimmerman and Kremer, 1986) や、非組織タンパク質 (Gerard, 1982a) が主要な貯留窒素であり、 $\text{NO}_3\text{-N}$ のプールは極めて小さい。一方、同属の *M. integrifolia* では、アミノ酸態窒素に比較して $\text{NO}_3\text{-N}$ の含量が大きく変動し、総窒素含量の 18% 程度になることもある (Wheeler and Srivastava,

1984)。 *M. integrifolia* の生育地では、表層海水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が最大で $23\ \mu\text{M}$ 以上になるので (Wheeler and Srivastava, 1984), *M. pyrifera* の生育環境に比べて栄養塩が多いことも関連するのかもしれない。

紅藻オゴノリ類 *Gracilaria* では、フィコエリスリンの含有量は低光量下で上昇し、光エネルギーの効率的な捕捉に役立つ。一方、光条件が好転すると、余剰のフィコエリスリンは急速な成長に伴う窒素不足を軽減するために活用される (Lapointe, 1981; Lapointe and Duke, 1984)。十分な栄養塩濃度のもと、低光量適応させたオゴノリ類 *G. foliifera* は、高光量下の藻体の2倍のクロロフィル *a* およびフィコエリスリン含量を有した。しかし、両藻体を十分な光量下で育成したところ、同様の生長を示した (Lapointe, 1981)。また、栄養充足させた *Gracilaria* を窒素量を制限した培養条件で育成したところ、藻体の成長が窒素制限を示すまで7~10日間かかり、その間フィコエリスリン含量は減少した (Lapointe and Ryther, 1979)。これらの事実は、フィコエリスリンは、弱光もしくは補色馴応用の光アンテナという主たる機能の他、窒素貯留という副次的機能も有していることを示す (Lapointe, 1981)。

Rosenberg and Ramus (1982) が、オゴノリと緑藻アオサの藻体内の可溶性窒素分の季節変化を調べたところ、両種において遊離アミノ酸が窒素プールとして最も重要であった。しかし、可溶性窒素分の含量はオゴノリの方がはるかに多く、季節によっては蛋白質が半分を占め、さらにその3分の1程度がフィコエリスリンであった。一方、アオサの可溶性窒素分における蛋白質含量は多くて15%程度であった。成長率は概してアオサの方が高いが、アオサの成長と窒素含量は栄養塩の供給に伴って大きく変動したのに対し、オゴノリのそれらはより安定していた。

スペイン・マラガの紅藻チシマクロノリ *Porphyra umbilicalis* は、その繁茂期に藻体中に $\text{NO}_3\text{-N}$ を最大で $200\ \mu\text{mol/gDW}$ 蓄積し、海水中と比較しその濃縮率は42,000倍にもなる。同地の海水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、 $6.8\sim 17.6\ \mu\text{M}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 ($1\sim 6.7\ \mu\text{M}$) に比して極めて高い。これらの栄養塩は藻体に吸収された後、エネルギー効率の良い $\text{NH}_4\text{-N}$ から先に利用され、回転率の低い $\text{NO}_3\text{-N}$ が蓄積される。海水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が $8\ \mu\text{M}$ 以下になると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を還元する硝酸還元酵素 (nitrate reductase) が活性化し、藻体内の $\text{NO}_3\text{-N}$ の急速な利用が進む (Hernández *et al.*, 1993a)。カナダの British Colombia で採集された同属のアモノリ類 *P. perforata* でも $12\ \mu\text{mol/gWW}$ の $\text{NO}_3\text{-N}$ を貯留していたが、窒素源を含まない培地

で培養したところ、3日で枯渇した (Thomas and Harrison, 1985)。アオサと同じく藻体の薄い膜状のアモノリ類は成長率が大きく、貯留した窒素に依存できる期間は短いと考えられる。

一般的に、成長が早く、吸収した栄養塩の回転率に比して貯留量が小さい種は、体内貯留に依存できる期間は短く、低栄養塩状態が続くことへの耐性が低いものと考えられる。逆に、成長は遅いが、相対的に貯留量が多い種は耐性が高くなると予想される。したがって、Littler and Littler (1980), Littler and Arnold (1982) による海藻類の機能形グループ間で、単位時間あたりの光合成量や栄養塩吸収量の大小に傾向が認められたように、体内貯留に依存できる期間についても差があることが予想される (Rosenberg and Ramus, 1982; Rosenberg *et al.*, 1984)。これまでに解明された海藻類が体内に貯留した窒素で成長を継続できる期間は、グループ I のアオサ、アモノリ類で10日程度 (Fujita, 1985), グループ III~IV のオゴノリ類 (Ryther *et al.*, 1981/1982; Fujita, 1985), ヒバマタ類 (Rosenberg *et al.*, 1984), ホンダワラ類 (Scaffelke and Klumpp, 1998b), ジャイアントケルプ (Gerard, 1982a) で数週間程度、コンブ類で2カ月程度 (Chapman and Craigie, 1977; Mizuta *et al.*, 1992) である。これらの結果は、手法や用いられた材料の履歴も異なり単純比較は出来ないが、前述の機能形の仮説に適合する傾向を示している。海藻類が貯留した栄養塩に依存できる期間は、栄養塩濃度が短期間に大きく変動する環境や、逆に季節変化など比較的長期の時間的スケールで変動する環境など、栄養塩供給の頻度と量に応じてその種の生存に関わるので、生態学的に極めて重要である (Fujita, 1985; Shcaffelke and Klumpp, 1998b)。

3.3. 藻体の窒素・リン含量が示す情報

前述のように海藻類が体内に貯留する栄養塩は、藻体が含有する全窒素・リン含量のうちのかかなりの部分を占める場合がある。したがって、藻体を含む総窒素あるいはリン含量を測定することにより、海藻類の「栄養状態」の簡便な指標とすることが可能である。また、海藻類の栄養状態は海水中の栄養塩濃度の影響を受けるので、窒素・リン含有量は海藻類が生育する栄養塩環境の指標ともなる。藻体の窒素・リン含量は海水中の DIN, DIP 濃度と相関する (Asare and Harlin, 1983; Wheeler and North, 1981) 場合が多いが、短期的に栄養塩濃度が大きく変動するような生育地では、むしろ藻体の窒素・リン含量の方が、「履歴」と

して海藻類にとつての栄養塩環境をよりの確に反映する場合もある。

水生植物の窒素・リン含量やその相対的比率は、分類群や種によって大きく異なる (Niel, 1976; Atkinson and Smith, 1983; Duarte, 1992)。世界各地で測定された169種の水生植物の炭素・窒素・リン含量比をレビューした例 (Duarte, 1992) では、植物プランクトンの炭素・窒素・リン含量比の中央値が、その増殖に理想的な Redfield 比の106:16:1 (モル比) に近い110:16:1であったのに対し、seagrass 海草類は435:20:1、また、海藻類は、800:49:1であった。貧栄養の熱帯・亜熱帯海域で採取されたサンプルの結果を多く含むことにもよるが、海藻類は植物プランクトンや海草類と比較して窒素、リン含量ともに相対的に少なく、多くの天然の個体群が栄養塩不足の環境下にあると推測されている (Duarte, 1992)。

また、やはり9箇所の生育地から92種の海藻・

海草類の炭素・窒素・リン含量比をレビューした Atkinson and Smith (1983) は、熱帯域などの低栄養塩海域と比較的高栄養塩の海域の海藻・海草類の間に、分類群や種間の差異をマスクするレベルの窒素・リン含量比の違いを見出している。異なる生育地の個体群、場合によっては多くの種を含む群集の栄養塩環境を相対的に評価するとき、窒素・リン含量は利便性の高い指標であり、多くの生理生態学的な研究に用いられている (e.g. Lyngby, 1990)。

窒素・リン含量は同一種でも季節的に大きく変化し、栄養塩濃度の季節変化の影響の他に、海藻類がその生活史の中でどのステージにあるか、すなわち成長期にあるか、もしくは休眠期や成熟期にあるかなどで異なる (Niel, 1976)。Table 2に既往知見による海藻類の単位乾燥重量あたりの炭素、窒素、リン含量 (% DW) の年間の変動幅を示した。一般的に、窒素、リン含量は、組織の骨格の主要成分である炭素よりも

Table 2. Seasonal ranges in carbon, nitrogen and phosphorus content (%DW) in macroalgae.

*; data were read on the original figures

Species (thallus part or sampling site)	C	N	P	Remark	Citation
Chlorophyta					
<i>Ulva rigida</i>	*21-33	*1.4-4.4	*0.06-0.33	N limitation in summer	Sfriso (1995)
<i>Codium fragile</i>		*0.6-3.5		N limitation in summer	Hanisak (1979b)
<i>Codium fragile</i>		*2.0-3.5			Asare & Harlin (1983)
<i>Cladophora aff. albida</i>		*1.2-4.0	*0.05-0.32	P limitation in summer	Birch <i>et al.</i> (1981)
Phaeophyta					
<i>Chordaria flagelliformis</i>	*32-36.5	*2.1-3.8			Probyn & Chapman (1983)
<i>Laminaria saccharina</i>		*1.0-2.3			Asare & Harlin (1983)
<i>Laminaria digitata</i> (St. Andrews)		*0.4-1.6	*0.35-0.95		Conolly & Drew (1985)
(Fifeness)		*0.2-1.0	*0.1-0.40	N and P limitation	Conolly & Drew (1985)
<i>L. saccharina</i> (St. Andrews)		*0.4-1.7	*0.2-0.55		Conolly & Drew (1985)
(Fifeness)		*0.2-1.4	*0.05-0.25	N and P limitation	Conolly & Drew (1985)
<i>Laminaria japonica</i>		*1.2-2.4			Mizuta <i>et al.</i> (1992)
<i>Macrocystis pyrifera</i> (frond)	23-28	*1.0-2.4			Wheeler & North (1981)
<i>Macrocystis integrifolia</i> (frond)	23.2-30.5	0.83-2.96			Rosell & Srivastava (1985)
<i>Nereocystis luetkeana</i> (blade)	19.8-27.9	0.93-2.91			Rosell & Srivastava (1985)
<i>Phyllariopsis purpurascens</i> (blade)	*21-32	*1.0-1.8	*0.05-0.31	P limitation in October	Flores-Moya <i>et al.</i> (1995)
<i>Undaria pinnatifida</i> (adult)		1.73-4.04	0.86-1.34	N limitation in summer	Campbell <i>et al.</i> (1999)
(juvenile)		0.89-3.17	0.35-0.79	N limitation in summer	Campbell <i>et al.</i> (1999)
<i>Fucus vesiculosus</i>		*1.0-3.0			Asare & Harlin (1983)
<i>Fucus vesiculosus</i>		*1.0-4.5	*0.17-0.54	No N and P limitation	Schramm <i>et al.</i> 1988
<i>Ascophyllum nodosum</i>		*1.1-2.6			Asare & Harlin (1983)
<i>Sargassum baccularia</i> (young)		*0.7-1.3	*0.05-0.11	N and P limitation	Schaffelke & Klumpp (1998a)
<i>S. sandei</i>	*25-28	*1.1-2.1	*0.07-0.09	N and P limitation	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. berberifolium</i>	*17-32	*1-3.6	*0.03-0.18	N and P limitation	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. polycystum</i>	*20-31	*1-2.7	*0.07-0.13	N and P limitation	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. siliquosum</i>	*23-30	*0.2-1.8	*0.08-0.22	N and P limitation	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>Myagropsis myagroides</i> (leaf)	*28-37	*0.9-3.3	*0.06-0.30		Yatsuya <i>et al.</i> (2008)
<i>Sargassum macrocarpum</i> (leaf)	*34-40	*0.7-3.1	*0.04-0.33		Yatsuya <i>et al.</i> (2008)
<i>S. patens</i> (leaf)	*28-34	*0.8-2.3	*0.05-0.29		Yatsuya <i>et al.</i> (2008)
<i>S. siliquastrum</i> (leaf)	*34-42	*0.9-3.7	*0.04-0.30		Yatsuya <i>et al.</i> (2008)
<i>S. piluliferum</i> (leaf)	*32-36	*1.2-2.6	*0.07-0.17		Yatsuya <i>et al.</i> (2008)
Rhodophyta					
<i>Chondrus crispus</i>		*1.7-4.8			Asare & Harlin (1983)
<i>Chondrus crispus</i>			*0.15-0.33		Chopin <i>et al.</i> (1989)
<i>Ceramium rubrum</i>		*1.0-6.0	*0.01-0.65	N and P limitation in summer	Lyngby (1990)
<i>Phycodrys rubens</i>		*3.0-5.3	*0.10-0.31	N limitation in summer	Schramm <i>et al.</i> (1988)
<i>Porphyra umbilicalis</i>	*28.5-34.5	*2.5-4.3	*0.15-0.40	P limitation in winter	Hernández <i>et al.</i> (1993a, b)

相対的な変動幅が大きく、年間に数倍のオーダーで変動する。また、同一の生育地においても、種により季節的な変動幅は大きく異なる (Asare and Harlin, 1983; 八谷ら, 2008)。窒素含量においては、褐藻類で $< 1 \sim 3\%$ 程度の範囲で変動するのに対し、緑藻・紅藻類では $< 2 \sim 4\%$ 程度の範囲で変動し、最小・最大値とも褐藻類と比較して大きい傾向がある。また、リン含量の年変動の知見はより少ないが、 $0.05 \sim 1\%$ 以上の範囲で変動している (Table 2)。

このように大きく変動する窒素・リン含量を海藻類の栄養状態の指標として用いる場合、どの程度のレベルであれば足りているのか、また、不足しているのか、目安となる数値が必要である。栄養塩制限下にある植物プランクトンの細胞内の栄養素含量と増殖速度の関係は、ある含量で増殖速度が飽和する直角双曲線型のモデル (Droop のモデル) で表現出来る。同様に、海草・海藻類においても、成長が飽和する藻体内の窒素・リン含量の境界値 (critical nitrogen or phosphorus level) が存在する (Gerloff and Krombholz, 1966; Hanisak, 1979b)。Hanisak (1979b) はミル *Codium fragile* の成長率とその窒素含量の関係を調べ、窒素含量が乾重量あたり 1.9% に達するまで成長は直線的に増加するが、それ以上では成長は飽和することを明らかにした (Fig. 6)。この成長が飽和する境界より窒素含量が低い場合、藻体の成長は窒素制限を受けており、またそれ以上の場合は余剰の窒素が体内で貯留されているということになる。米国・ロードアイランド州沿岸の天然のミルの窒素含量は、夏季に成長飽和境界値を下回ることから、同時期の成長が窒素制限を受

けていると推測された (Hanisak, 1979b)。

成長に対する窒素・リン含量の飽和境界値は、一般的に栄養塩以外の要因が制限とならないような実験条件下で求められるので、単一の境界値を様々な未知の要因が作用する天然の個体群に適用する場合の問題も指摘されている (Lapointe and Duke, 1984)。前節に詳述したオゴノリ類 *Gracilaria tikvahiae* は、変動する光環境に対し、光合成色素とタンパク質の集合体である光合成ユニットの数を調節し対応している。低い光量下ではユニット数を増加させ、光合成能が最大となるように光順応を行っており、このような藻体は十分な光量下で生育した藻体よりも多くの窒素を含み (Lapointe and Duke, 1984)、境界値も高いと考えられる。また、海藻が急速に成長する時期や成熟期、休眠期などにある場合それぞれ必要とする栄養塩量も異なり、窒素・リン含量の成長飽和境界値も異なるはずである。また、アオサ類 *Ulva rigida* (Fujita *et al.*, 1989) や褐藻ナガマツモ (Probyn and Chapman, 1983) では、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ をそれぞれ基質とした場合では異なる成長飽和境界値が得られており、天然の個体群への適用はより複雑である。

しかし、それにも関わらず、ある種の成長における窒素・リン含量の成長飽和境界値が把握されていれば、その海藻の栄養状態や生育する栄養塩環境を推定する上で便利であることは間違いない。これまでの研究事例では、栄養塩以外の要因が制限要因となっている時期には体内貯留が形成されており、栄養塩制限は問題にならない場合がほとんどである。

これまでに、いくつかの種で窒素・リン含量の成長飽和境界値が明らかにされている (Table 3)。未だ事例は少ないものの同値は種により差があり、褐藻類に比べ緑藻類のほうが高く、また、アオサ・アオノリ類のように形態が単純で成長が速い種で高いという、Littler and Littler (1980) の機能形による分類に沿った傾向も見いだされる。多くの場合 Hanisak (1979b) と同様に、窒素・リン含量が成長飽和境界値を上回るか下回るかにより天然の個体群の栄養状態の把握が試みられており、同一生育地の異なる種間や、同一種の異なる個体群間で、栄養塩制限状態に差異があることが明らかにされている (Wheeler and Björnsäter, 1992; Schaffelke and Klumpp, 1998a; Hwang *et al.*, 2004)。

窒素・リン含量だけでなく、N/P 比により海藻が窒素制限を受けているか、リン制限を受けているか把握する試みもなされている (Björnsäter and Wheeler, 1990; Wheeler and Björnsäter, 1992) が、明らかにされた種の事例が未だ少ない。また、成長が

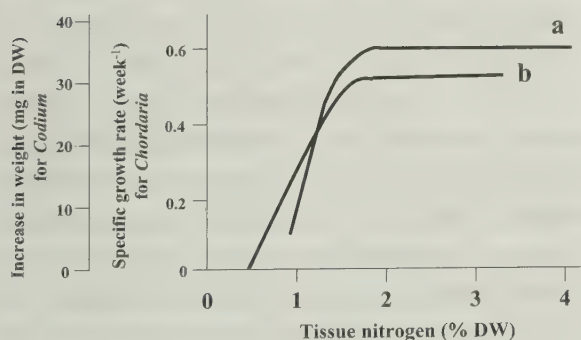


Fig. 6. Two examples of relationship between tissue nitrogen (%DW) and macroalgal growth. a; *Codium fragile* from Hanisak (1979b). Growth is indicated as increase in weight (mg in DW) during 21-day-culture. b; *Chordaria flagelliformis* under NH_4 for nitrogen source from Probyn and Chapman (1983). Growth is indicated as specific growth rate (week⁻¹).

Table 3. critical nutrient contents for growth of macroalgae

Species	taxon.	Critical tissue N (% DW)	Critical tissue P (% DW)	Citation
<i>Ulva rigida</i>	Chl. Ulvales	3.0 (under NH_4) 2.4 (under NO_3)	—	Fujita <i>et al.</i> (1989)
<i>U. fenestrata</i>	Chl. Ulvales	3.2	—	Björnström & Wheeler (1990)
<i>Enteromorpha intestinalis</i>	Chl. Ulvales	2.0	0.2	O'Brien (1987)
<i>E. intestinalis</i>	Chl. Ulvales	2.5	—	Björnström & Wheeler (1990)
<i>Cladophora albida</i>	Chl. Cladophorales	2.1	0.33	Gordon <i>et al.</i> (1981)
<i>Cladophora</i> spp.	Chl. Cladophorales	1.5	—	Wong & Clark (1976)
<i>Codium fragile</i>	Chl. Codiales	1.9	—	Hanisak (1979b)
<i>Dictyosphaeria cavernosa</i>		1	—	Larned & Stimson (1996)
<i>Chordaria flagelliformis</i>	Pha. Chordariales	1.5 (under NH_4) 0.9 (under NO_3)	—	Probyn & Chapman (1983)
<i>Laminaria japonica</i>	Pha. Laminariales	2.4	—	Mizuta <i>et al.</i> (1992)
<i>Pelvetiopsis limitata</i>	Pha. Fucales	1.5 (under NO_3)	*0.35	Fujita <i>et al.</i> (1989)
		* Extrapolated from Fig. 4 in Wheeler & Björnström (1992)		
<i>Sargassum sandei</i>	Pha. Fucales	1.38	0.16	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. berberifolium</i>	Pha. Fucales	1.67	0.12	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. polycystum</i>	Pha. Fucales	1.99	0.15	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. siliculosum</i>	Pha. Fucales	2.36	0.19	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. baccularia</i>	Pha. Fucales	0.86	0.09	Schaffelke & Klumpp (1998a)

飽和する境界値だけでなく、藻体が含有する窒素・リン量の最小レベル (subsistent level; 生存境界値) もいくつかの種類で明らかにされている。これは、藻体組織を維持するのに必要な最小限の窒素・リン含量であり、窒素の場合、褐藻のナガマツモやヒバマタ類 (Rosenberg *et al.*, 1984)、ホンダワラ類で0.3~0.8% (Hwang *et al.*, 2004)、コンブ類で1.3% (Chapman *et al.*, 1978; Mizuta *et al.*, 1992)、緑藻ミルで0.8% (Hanisak, 1979b)、シオグサ類で1.2% (Gordon *et al.*, 1981)、またリンの場合、シオグサ類 (Gordon *et al.*, 1981)、アマノリ類 (Hernández *et al.*, 1993b) やホンダワラ類 (Hwang *et al.*, 2004) など0.05% 以下の値が得られている。生存境界値についても、海藻類がどの程度の栄養塩欠乏に耐えられるのかを明らかにするために重要な指標であると考えられる。窒素・リン含量の成長飽和境界値、生存境界値とも明らかにされた種類は未だに少なく、特に我が国の海藻類についてはほとんど明らかにされていない。今後、少なくとも主要種についてはこれらの基礎的な知見を集積する必要がある。

3.4. 一次生産の「適正栄養塩」レベルについて論じた例

本報文の冒頭において述べたように、近年の瀬戸内海域の栄養塩レベルの低下に伴い、持続的な漁業生産を保証する「適正栄養塩」レベルの把握が求められている。海藻類にとっての「適正栄養塩」レベルとは、まず水中の DIN や DIP が制限要因とならず、最大の

成長や光合成が見られる濃度レベルである、と定義できるであろう。実際に、天然の生育地でどのくらいの栄養塩濃度が必要か、科学的に解明された例は少ないと思われる。しかし、海藻類の成長または光合成が飽和する栄養塩濃度については、いくつかの種類で実験的に明らかにされている。Table 4に、既往文献における上記の定義による栄養塩濃度を示した。それぞれの実験は異なる手法で行われているので、その結果の正確な比較は困難である。しかし、大まかな分類群ごとの傾向は見出すことが出来る。

コンブ類やホンダワラ類など、大型褐藻類で成長が飽和する栄養塩濃度は種によりばらつきは認められるものの、おおよそ DIN で $4 \sim 15 \mu\text{M}$ (生育地で求められた *Macrocystis* の値は除く)、DIP で $0.25 \sim 0.75 \mu\text{M}$ である (Table 4)。特に「適正」DIP については知見が少なく、低栄養塩環境に適応した熱帯・亜熱帯域のホンダワラ類についてのみの値であるので過小評価の可能性がある。しかし、これらの適正栄養塩濃度の範囲は、第2章でレビューした温帯海域の比較的栄養塩濃度の高い時期の値 (Table 1) とほぼ等しい。ヒバマタ類 *Fucus spiralis* (Topinka and Robbins, 1976) の例では、実験で $5 \mu\text{M}$ および $35 \mu\text{M}$ の2条件の DIN 濃度しか設定されていないが、成長は $35 \mu\text{M}$ の方が良好であり、他の褐藻類に比較して適正濃度が高い。前節までに述べたように、潮間帯に生育するヒバマタ類はその生育環境の特殊性から、他の漸深帯に生育する海藻類とは異なる性質を有しているのかもしれない。最適 DIN 濃度が $1.5 \sim 2.0 \mu\text{M}$ と低いジャイアントケルプ *Macrocystis pyrifera* (Zimmerman

Table 4. Suitable nutrient concentrations under which the maximum growth or photosynthesis is attained

	DIN	DIP	Measurement	Methods	Citation
Chlorophyta					
<i>Ulva lactuca</i>	43	19	photosynthesis	continuous flow culture	Waite & Mitchell (1972)
<i>Codium fragile</i>	68 (NO ₃)	—	growth	batch culture	Hanisak (1979b)
<i>Cladophora albida</i>	28.6	6.5	growth	batch culture	Gordon <i>et al.</i> (1981)
<i>Dictyosphaeria cavernosa</i>	17	—	growth	continuous flow culture	Larned & Stimson (1996)
Phaeophyta					
<i>Chordaria flagelliformis</i>	3–5	—	growth	continuous flow culture	Probyn & Chapman (1983)
<i>Laminaria saccharina</i>	5–10 (NO ₃)	—	growth	continuous flow culture	Wheeler & Weidner (1983)
<i>Laminaria saccharina</i>	10 (NO ₃)	—	growth, photosynthesis	continuous flow culture	Chapman <i>et al.</i> (1978)
<i>L. religiosa</i> (gametophyte)	6 (NO ₃)	—	growth	batch culture	Kawai <i>et al.</i> (2004)
<i>Macrocystis pyrifera</i>	1.5–2.0 (NO ₃)	—	growth	field observation	Zimmerman & Kremer (1986)
<i>Fucus spiralis</i>	35 (NO ₃ or NH ₄)	—	growth	batch culture	Topinka & Robbins (1976)
<i>Sargassum sandei</i>	12 (NO ₃ +NH ₄)	0.6	growth	continuous flow culture	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. berberifolium</i>	15 (NO ₃ +NH ₄)	0.75	growth	continuous flow culture	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. polycystum</i>	6 (NO ₃ +NH ₄)	0.3	growth	continuous flow culture	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. siliquosum</i>	9 (NO ₃ +NH ₄)	0.3	growth	continuous flow culture	Hwang <i>et al.</i> (2004)
<i>S. baccularia</i>	2–4 (NH ₄)	0.25–0.45	growth	continuous flow culture	Schaffelke & Klumpp (1998a)
Rhodophyta					
<i>Gracilaria foliifera</i>	5.3–5.5	—	growth	continuous flow culture	DeBoer <i>et al.</i> (1978)
<i>Neoagardhiella baileyi</i>	5.3	—	growth	continuous flow culture	DeBoer <i>et al.</i> (1978)

and Kremer, 1986) の例は、生育地（カリフォルニア・Santa Catalina Is.）において、Monodの直角双曲線モデルで表現できた海水中のNO₃-N濃度と藻体の成長の関係から、成長が飽和する濃度として求められたものである。

緑藻類については、成長が飽和するDIN濃度は17～63 μM、DIP濃度は6.5～19 μMと、褐藻類と比較して高い傾向があった。アオサ類やミルでは特に高く、やはり第2章でレビューしたように、富栄養化が進行した環境はこれらのグリーンタイドの原因となる海藻類に有利であることを裏付けている。紅藻オゴノリ類 *Gracilaria foliifera* と *Neoagardhiella baileyi* について、窒素源と成長の関係を調べた DeBoer ら (1978) の論文では、藻体による吸収を受けた後の栄養塩濃度と成長の関係を図示している。それによると、両種の成長が飽和するDIN濃度はそれぞれ1.5および0.7 μM程度とされているが、供給されたDIN (NO₃-N+NH₄-N) 濃度はいずれも5.3～5.5 μM程度である。Table 4には供給時のDIN濃度を示した。

一般的に、実験室内で成長と栄養塩濃度との関係を調べる時、光や温度、流動など他の諸要因については十分な条件を与える。したがって、これらの実験の結果から、複数の環境要因が大きく変動し、時には制限要因となる天然の生育地の「適正栄養塩」を論じることが困難なのは言うまでもない。例えば、実験条件下のコンブ類 *Laminaria saccharina* の成長は、5～10 μMのNO₃-N濃度で飽和し、窒素の体内貯留は20 μM以上で形成される (Chapman *et al.*, 1978 ;

Wheeler and Weidner, 1983)。しかし、生育地のSt. Margaret Bayでは、冬季の6～7 μMのNO₃-N濃度下で貯留が形成されている。これは、生育地では冬季に栄養塩制限が解除され藻体は急速に成長するが、実際は低い光量や水温などが光合成の制限要因となって、炭素と窒素の同化速度に差が出た結果、窒素貯留が形成されるものと考えられる (Chapman *et al.*, 1978)。他要因が制限要因とはならない実験下で把握された適正栄養塩レベルは、生育現場における適正栄養塩レベルと比較して過大評価気味であると考えられる。

カリフォルニア沿岸のジャイアントケルプ *Macrocystis pyrifera* では、NO₃-Nの吸収モデルから藻体の成長の維持に必要な現場海域でのNO₃-N濃度が算出されている (Gerard, 1982c)。同地では、湧昇や陸水流入の時期を除き、NO₃-N濃度はしばしば1 μM以下となり低いが、天然の個体群は4 % / 日程度の成長率を示す。藻体内には窒素貯留も形成されていることから窒素制限は起こっていないと考えられ、光など他要因が成長の制限要因となっていること、他、NH₄-Nの効率的な活用の可能性が考えられている。モデルからの見積もりでは、2 μM程度のNO₃-Nのみで十分この成長率を支えることが出来るとされている (Gerard, 1982c)。この値は、分類上近いコンブ類において実験室内で求められた成長が飽和するNO₃-N濃度 (5～10 μM) より低く、天然個体群の成長データから求められた成長飽和濃度1.5～2.0 μM (Zimmerman and Kremer, 1986) にほぼ等しい

(Table 4)

第4章 瀬戸内海の藻場の栄養塩環境とその相対評価

これまでに、世界の各海域の様々な海藻類の生育地の栄養塩環境について既往知見をレビューした。また、海藻類による栄養塩の吸収や貯留に関する既往知見、さらには、海藻類の“栄養状態”を判断する上での藻体の窒素・リン含量の有効性について整理した。ここでは、これらの情報をもとに、これまで我々の研究所が主には広島湾で取得した栄養塩のモニタリングデータ、また、藻場海藻の窒素・リン含量に関するデータを整理し、瀬戸内海の藻場の栄養塩環境の相対的な評価を行った。

4.1. 既往資料における瀬戸内海・広島湾の栄養塩環境と藻場分布

広島湾は、水産庁の海域区分では安芸灘に含まれるが、本論では環境省の海域区分に準じた寺脇ら(2002)、内村ら(2003)に従い、広島県・倉橋島と山口県・屋代島、および本州側の海岸線に囲まれた海域を広島湾とする(Fig. 7)。広島湾では、厳島と西能美島の間にある那沙美瀬戸を境界に北部と南部では海況特性が大きく異なることが明らかになっており、北部海域は閉

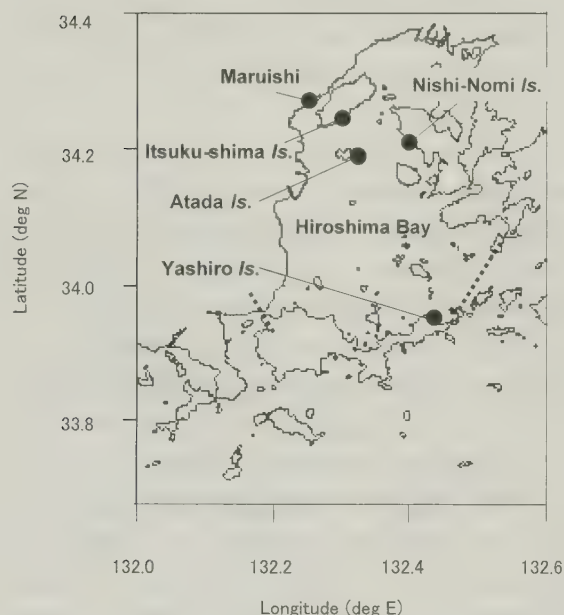


Fig. 7. Monitoring sites of nutrient in seawater (Maruishi, Itsuku-shima- and Yashiro-jima Is.) and sampling sites of macroalgae (Maruishi, Nishi-Nomi-jima, Atada-jima- and Yashiro-jima Is.).

鎖性が強く湾奥に流入する太田川の影響を強く受け、また、南部海域は湾口部を通じて隣接する安芸灘、伊予灘との海水交換の影響を強く受けている(橋本ら, 1994; 山本ら, 2002)。

浅海定線調査によると、1973~2002年の広島湾の栄養塩濃度の年平均値は、DINで表層 $5.67\mu\text{M}$ 、底層 $5.60\mu\text{M}$ で、瀬戸内海の中では表層は大阪湾に次いで、また、底層は大阪湾、播磨灘に次いで高い。また、DIP濃度は表層 $0.33\mu\text{M}$ 、底層 $0.51\mu\text{M}$ で表層は大阪湾、播磨灘に、底層は大阪湾に次いで高い(独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所, 2005)。大阪湾が突出しているものの、広島湾の栄養塩レベルは瀬戸内海の平均より上であり、DIN、DIPとも最も低い周防灘の2~3倍の濃度である。ただし、浅海定線調査における広島湾の調査点は、全て広島県側、すなわち阿多田島より湾奥側にあり、太田川をはじめとする河川流入の影響が大きいものと考えられる。

一方、藻場については、長期的な変遷を詳細に追跡できる資料は存在しない。わずかに1960年、1966年のアマモ場の分布(内海区水産研究所資源部, 1967)や、1971年のアマモ場・ガラモ場の分布(南西海区水産研究所, 1974)、また、1978年、1989~1990年に実施された環境庁(現環境省)の第2回、第4回自然環境保全基礎調査のタイプ別の藻場分布に関する報告(環境庁自然保護局・助海中公園センター, 1994)があるのみである。

第4回自然環境保全基礎調査の結果では、1989~1990年時点で、上述の定義における広島湾にはアマモ場254ha、ガラモ場171haが存在したが、そのうちそれぞれ67、87%が岩国市や屋代島、倉橋島南岸などを主にした湾央域から湾口域にかけて存在していた(寺脇ら, 2002; 内村ら, 2003)。特に、ガラモ場をはじめとする岩礁性藻場は湾口に近い島嶼部に多かった。

広島湾における、岩礁性藻場の植生の特徴とその分布様式については寺脇ら(2001)にまとめられている。すなわち、湾の最奥域から厳島にかけては、砂泥質の海底が卓越することもあり、緑藻アナアオサ *Ulva pertusa* や紅藻のマクサ *Gelidium elegans* が潮間帯から漸深帯上部に優占する。特に、厳島から湾の奥域にかけては、1990年代にアオサ類の大増殖(グリーンタイド)が社会問題となった(Uchimura *et al.*, 2004)。湾奥域の局所に限定すれば、アオサ類はアマモ場・ガラモ場をしのぐ現存量・年間生産量を有していると見積もられている。一方、湾央域の阿多田島から湾口域の屋代島にかけては、深所まで岩礁が続く場所が増え、ヒジキ *Sargassum fusiforme*、1年生ホン

ダワラ類のアカモク *S. horneri*, 多年生ホンダワラ類のノコギリモク *S. macrocarpum* などのホンダワラ類（ガラモ）が、潮間帯から水深5m付近まで帯状に群落を作り、さらにそれより深所にはアラメ *Eisenia bicyclis* と近縁のクロメ *Ecklonia kurome* が10mを越える水深まで優占する。広島湾全体では砂泥域に群落を作るアマモ *Z. marina* によるアマモ場の面積が最も大きい、ホンダワラ類の単位面積当たりの現存量・生産量が際だって大きいため、藻場全体の年間生産量における貢献度はガラモ場が最も大きい（寺脇ら、2002；内村ら、2003）。

4.2. 広島湾の藻場周辺の栄養塩環境

広島湾の湾奥から湾口にかけて、3カ所（廿日市丸石、厳島、屋代島）の藻場周辺で観測した栄養塩濃度の季節変化を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。丸石では1999年11月から2006年2月まではほぼ2週間から1カ月間隔で、また、厳島と屋代島では2002年1月から2003年3月まで毎月、その後2004年2月まで2カ月に1回の頻度で表層海水を採水し、栄養塩自動分析装置 TRAACS2000（プラン・ルーベ社製）で分析した。

湾最奥域の丸石（Fig. 8）では、観測期間に DIN が $0.74 \sim 18.96 \mu\text{M}$ の範囲で変動し、観測期間を通じた平均は $6.04 \mu\text{M}$ であった（Fig. 8）。また、DIN における $\text{NH}_4\text{-N}$ の占める割合は平均で32.5%であった。一方、DIP は $0.04 \sim 1.30 \mu\text{M}$ の範囲で変動し、観測期間を通じた平均は $0.45 \mu\text{M}$ であった（Fig. 8）。DIN、DIP とも春季から夏季に比較的低く、9月以降上昇し、冬季にかけて比較的長期間高レベルで維持される季節変化が見られた。春季から夏季の低レベル期には、DIN で $2 \mu\text{M}$ 以下、DIP で $0.2 \mu\text{M}$ 以下になるが、明らかに降雨の影響と思われるパルスが見られ、特に DIN は頻繁に $10 \mu\text{M}$ 以上に達した（Fig. 8）。また、特に DIP で顕著であるが、1999年以降秋季からの濃度の上昇のタイミングが年々遅れるとともに、ピークのレベルも徐々に低下していく傾向が見られた。この秋季から冬季の栄養塩レベルの低下の原因については不明であり、また、観測期間も短いために統計的な解析は不可能であった。

一方、厳島および湾口部の屋代島（Fig. 9）の藻場周辺の栄養塩濃度は、同じような季節変化を示すものの、総じて湾最奥域の丸石に比較しかなり低かった（Fig. 9）。厳島の DIN の変動範囲は $0.14 \sim 6.05 \mu\text{M}$ 、平均で $1.99 \mu\text{M}$ であり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の占める割合は平均で25.6%、DIP の変動範囲は $0.04 \sim 0.63 \mu\text{M}$ で、平均で $0.25 \mu\text{M}$ であった（Fig. 9）。また、屋代島の DIN

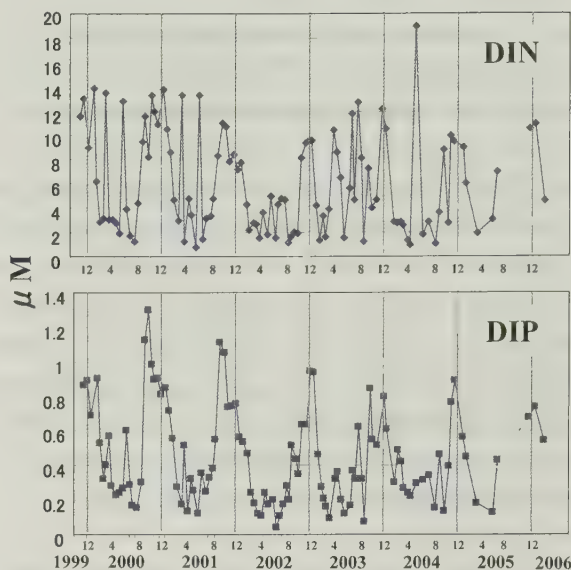


Fig. 8. Change in nutrient concentration in seawater at Maruishi (Hatsuka-ichi, Hiroshima) from 1999 to 2006.

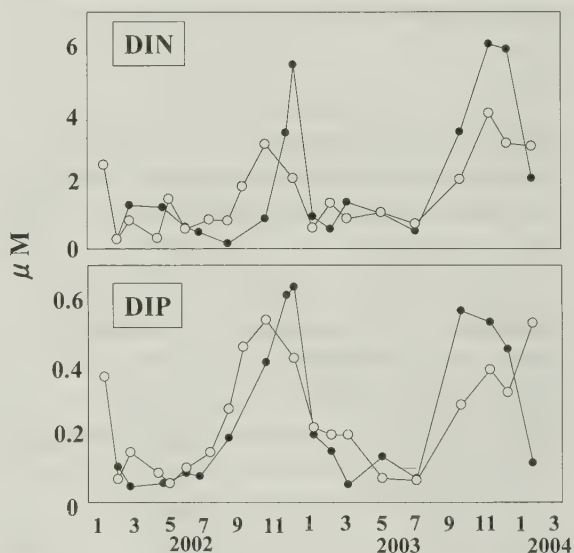


Fig. 9. Change in nutrient concentration in seawater at Itsuku-shima Is. (●) and Yashiro-jima Is. (○) from 2002 to 2004.

の変動範囲は $0.26 \sim 4.01 \mu\text{M}$ 、平均で $1.57 \mu\text{M}$ であり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の占める割合は平均で28.9%、また、DIP の変動範囲は $0.05 \sim 0.53 \mu\text{M}$ で、平均で $0.25 \mu\text{M}$ であった（Fig. 9）。観測の頻度の問題もあるが、広島湾の最奥域からそれほど距離が離れていない厳島で、すでに春季から夏季の河川水の流れによる顕著なパルスは確認できなかった。また、DIP 濃度は、厳島と湾口域の屋

代島の藻場でほぼ同レベルであった。

これらの結果を浅海定線の調査結果（独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所，2005）と比較すると，湾奥域（丸石）の藻場の栄養塩濃度は同報告書の広島湾のレベルとほぼ同様なのに対し，厳島より外側の湾央～湾口域では栄養塩濃度は大幅に低下し，伊予灘などに近いレベルになっている。湾奥域に限れば，その栄養塩レベルの季節変動の範囲は，第2章で概観した亜寒帯・温帯域の比較的营养塩が豊富な海域に匹敵するが，湾央～湾口域にかけては，他海域と比較しても必ずしも高いものではない。前述のように広島湾の岩礁性藻場のほとんどは湾央から湾口域に分布しており，相対的に栄養塩の少ない環境下にあるといえる。

4.3. 窒素・リン含量に見る広島湾の海藻類の栄養状態

それでは，実際に広島湾の藻場を構成する海藻類はどのような栄養状態にあるのか？湾内で採集された主要な海藻類の体中の窒素・リン含量と，前章までに

整理した他海域の海藻の窒素・リン含量の既往知見とを比較した。比較に供した海藻類は，広島湾奥域の廿日市市丸石の人工護岸に着生するアナアオサ，および広島湾央から湾口域の阿多田島，西能美島，屋代島のガラモ場の海藻類である。

アナアオサについては，1999年11月から2001年11月までは毎月1回現存量調査を行った際（Uchimura *et al.*, 2004）乾燥保存した藻体について，CHN コーダー MT-5（YANACO 社製）で藻体内窒素含量を分析した。また，ガラモ場の海藻については，2006年12月及び2007年1月に，上述の3島で採集したホンダワラ類およびその下草として生育していた計18種44株（Table 5）の海藻を乾燥粉末化し，元素分析計 Flash EA1112（Thermo 社製）で炭素・窒素含量を，またペルオキシニ硫酸カリウム酸化法を改変した手法（Wheeler and Björnström, 1992）でリン含量を分析した。ガラモ場の海藻については冬季1回の分析のみであるが，サンプリングを行った12月から1月は多くの藻場の海藻の成長期にあたる。特にホンダワラ類については，成長期を経て冬季の終わりから春季にかけて現存量は年間最大となって成熟し，1年生種のアカモ

Table 5. Carbon, nitrogen and phosphorus contents of each macroalgal species in *Sargassum* beds in Hiroshima Bay. At: Atada-jima Is., No: Nishi-nomi-jima Is., Ya: Yashiro-jima Is.

Species	Phyllum	Site	n	Mean contents (% DW)		
				C	N	P
Fucales						
<i>Myagropsis myagroides</i>	Pha.	Ya	3	30.50	2.80	0.35
<i>Sargassum fusiforme</i>	Pha.	At, No	2	28.68	2.28	0.28
<i>S. macrocarpum</i>	Pha.	At, No	2	35.58	2.90	0.30
<i>S. horneri</i>	Pha.	At, No, Ya	8	33.18	3.68	0.37
<i>S. micracanthum</i>	Pha.	Ya	1	34.64	2.40	0.20
<i>S. muticum</i>	Pha.	Ya	2	34.17	3.61	0.35
<i>S. piluriferum</i>	Pha.	At, No, Ya	6	30.86	2.71	0.20
<i>S. patens</i>	Pha.	At, No, Ya	4	32.05	2.79	0.19
<i>S. thunbergii</i>	Pha.	At	1	31.78	3.03	0.21
Other seaweeds						
<i>Amphiroa zonata</i>	Rho.	No	1	15.23	0.93	0.12
<i>Gelidium elegans</i>	Rho.	Ya	2	36.04	3.24	0.22
<i>Chondracanthus teedii</i>	Rho.	Ya	1	28.96	2.43	0.23
<i>Chondrus ocellatus</i>	Rho.	No	1	30.42	2.15	0.22
<i>Gracilaria incurvata</i>	Rho.	At, No, Ya	3	27.50	3.02	0.27
<i>G. textorii</i>	Rho.	Ya	1	28.24	3.29	0.25
<i>Padina arborescens</i>	Pha.	At, No, Ya	4	25.38	2.45	0.21
<i>Undaria pinnatifida</i>	Pha.	Ya	1	30.33	3.11	0.26
<i>Ecklonia kurome</i>	Pha.	Ya	1	30.74	2.44	0.21

クは藻体全体が、また、多年生種は主枝の部分が夏までに流失する。したがって、12～1月の栄養塩環境は、広島湾のガラモ場の一次生産において極めて重要であると考えられる。

アナアオサの窒素含量の季節変化を現存量の季節変化 (Uchimura *et al.*, 2004) とともに Fig. 10に示す。人工護岸等に着生するアナアオサは、10月以降秋季に新芽が出現して少しずつ成長し、5月から7月に年間最大の現存量になる。その後急速な流失が進み、夏季8月以降はほとんど流失してしまう。この現存量の年間サイクルに合わせ、窒素含量も秋季～冬季は比較的高く、現存量が年間最大値に達し減少に転じる春季～夏季には低下するという、不明瞭ではあるが水中の栄養塩濃度の変動にほぼ符合した季節変化を示した (Fig. 8, 10)。2000～2001年のシーズンは、藻体の窒素含量が前年に比して高いにも関わらず、現存量の増加は低かった。これは栄養塩 (少なくとも窒素) 以外の要因が制限要因となっていたのだろう。Fig. 10には、比較のために Table 3で示した他海域の海藻の窒素含量の成長飽和境界値も示した。破線 a はアオサ類 2 種の 3 つの値の平均値 2.9, 破線 B は熱帯性種のキッコウグサ *Dictyospharia cavernosa* を除く緑藻の平均値 2.3 である。どちらの基準をとっても、アオサの現存量が増加の途中にある 3 月以降、広島湾のアオサ藻体中の窒素含量はこれらの既往知見による成長飽和境界値を大幅に下回っている。前節で述べたように広島湾奥域では、瀬戸内海の他海域や湾内の他の場所と比較して栄養塩濃度が高い。しかし、そのレベルは、第 2 章で概観したグリーンタイドが起こっている他海域に比べ必ずしも高くはなく、また、春季以降、降雨時のパルスのな供給を除き栄養塩濃度は大幅に低下する。3 月以降は水温が上昇に転じ、日射量も増加するが、Fig. 10を見る限り、アオサには比較的強度の栄養塩制限 (特に窒素) が起こっており、必ずしもその潜在的な生産力を発揮できていない可能性がある。

ガラモ場の海藻種ごとの CNP 含量を Table 5に示

した。ジョロモク *Myagropsis myagroides* も含むホンダワラ類 (Fucales) では、C・N・P 含量はそれぞれ 28.7～35.6%, 2.3～3.7%, 0.19～0.37% の範囲にあった。藻体成分が特殊な有節石灰藻 (Niel, 1976; 吉田ら, 2001) のウスカワカニノテ *Amphiroa zonata* を除いた他の海藻類の C・N・P 含量は、それぞれ 25.4～36.0%, 2.2～3.3%, 0.21～0.27% の範囲であった。ホンダワラ類の C・N・P 含量について、調査地間で比較したところ (Table 6)、西能美島のホンダワラ類は窒素・リン含量とも若干低い傾向にあったが、調査地間で有意な差異は認められなかった。ホンダワラ類のアカモクとマメタワラについて種間比較をしたところ、窒素、リン含量に有意な差 (t 検定, $p<0.05$) が見られたので、本調査の地理的範囲では種間の差の方が大きいものと考えられた。広島湾の海藻類の CNP の比率 (モル比) の平均は 348 : 28 : 1 (Table 6) であり, Atkinson and Smith (1983) の海藻類の値だけの平均値 660 : 38 : 1, Duarte (1992) の大型藻類の平均値 800 : 49 : 1 と比較し低かった。すなわち、これ

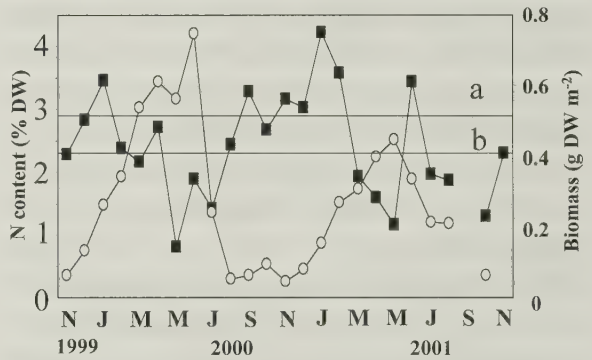


Fig. 10. Seasonal changes in tissue N content (■) and biomass (○; from Uchimura *et al.* 2004) of *Ulva pertusa* at Maruishi (Hatsuka-ichi, Hiroshima). Line A indicates mean critical tissue N for growth (2.9) of 2 *Ulva* species and Line B indicates mean critical N (2.3) of all Chlorophyta except for *D. cavernosa* in Table 3.

Table 6. Mean tissue CNP contents and ratio in macroalgae at 3 sites in Hiroshima Bay

	Tissue C (%DW)	Tissue N (%DW)	Tissue P (%DW)	C/N	C/P	N/P
Fucales						
Atada Is.	32.14±1.80	3.11±0.57	0.30±0.09	12.4±2.3	309.4±111.4	24.5±5.5
Nomi Is.	30.51±2.38	2.77±0.66	0.26±0.09	13.3±2.7	340.5±118.1	25.4±6.4
Yashiro Is.	33.47±3.30	2.99±0.60	0.30±0.07	13.5±3.1	312.7±94.4	23.1±4.2
Total						
Fucales	32.36±2.81	2.99±0.59	0.29±0.08	13.1±2.7	317.5±102.5	24.1±5.1
All seaweed	30.12±5.87	2.85±0.53	0.23±0.05	12.5±2.1	348.1±106.6	27.7±6.1

らの報告と比較して、窒素、リン含量の双方が相対的に高いものと考えられた

さらに、絶対量を評価するために、サンプルの窒素・リン含量のそれぞれについてNP比（モル比）を横軸にとってプロットし、既往知見の窒素・リンの成長飽和境界値との比較から窒素制限・リン制限の判定を試みた（Fig. 11）。窒素含量については、Table 3に示した全ての海藻類の成長飽和境界値の平均（Fig. 11中の破線 a:1.9）、およびホンダワラ類が含まれるヒバマタ目（Fuciales）の6種の成長飽和境界値の平均（同じく Fig. 11中の破線 b:1.6）と比較した。リンについても全種の成長飽和境界値の平均（破線 c:0.20）、およびヒバマタ目6種の成長飽和境界値の平均（破線 d:0.18）と比較した。

窒素含量については、石灰藻ウスカワカニノテ *A. zonata*を除きほぼ全てのサンプルで既往知見の成長境界値を超えた（Fig. 11）。リン含量については、ホンダワラ類ではヤツマタモク *Sargassum patens*, マメタワラ *S. piluliferum* などの数個体で、また、ウミウチワ *Padina arborescens*, マクサ *G. elegans*, ウスカワカニノテ *A. zonata* などで下回った。リン含量が破線 c を下回ったのは測定した全サンプルの18%であり、前述のようにヤツマタモクやマメタワラは、他種と比較して窒素・リン含量が低い特性があること、また、マクサのリン含量は個体差が大きいことから、これらの種において強度のリン制限が起こっている可能性は低いと考えた。

同じく Fig. 11中に 米国沿岸の海藻の藻体中の NP 比を記した。太平洋北西岸、大西洋北東岸に生育する海藻類の平均 NP 比は 15 ± 5 、また、大西洋亜熱帯海域に生育する海藻類の平均 NP 比は 43 ± 20 である（Wheeler and Björnstör, 1992）。一方、広島湾のガラモ場の海藻の平均 NP 比はホンダワラ類の平均で 24.1 ± 5.1 、全ての海藻の平均で 27.7 ± 6.1 であり、両海域の中間であった。Wheeler and Björnstör (1992) は、NP 比 < 12 で窒素制限、NP > 17 でリン制限としており、これに従うと広島湾の海藻類は亜熱帯海域ほどではないが、リン制限下にある。しかし、Wheeler and Björnstör (1992) の NP 比による栄養状態の判断は、緑藻のアオサ、アオノリ、褐藻 *Pelvetia* のわずか3種を用いて実験的に求められたものであること、この3種間でも大きく NP 比が異なること、また、栄養塩制限が起こっていないと判断された前出の大西洋北西岸の海藻類は、平均窒素・リン含量自体がそれぞれ1.04, 0.15と広島湾の海藻の平均値を大きく下回っていることなどから必ずしも広島湾の海藻類に適用するのは適当ではないと考えた。総じて、冬季には広島湾のガラ

モ場の海藻には豊富に窒素・リンが含まれており、少なくとも成長期に強度の栄養塩制限は起こっていないと判断した。

しかし、クロメ *E. kurome* や多年生ホンダワラ類、マクサなどの多年生小型海藻については、春季以降の栄養塩環境についても評価する必要がある。吉田ら（2001）は、広島湾の海藻について、春季（4月）、夏季（7月）にも炭素・窒素含量を調べている。それによると、それぞれの季節の窒素含量は、アナアオサで0.64, 1.97, フサイワズタ2.82, 2.62, マクサ2.32, 2.19, ヒジキ（葉および気胞）3.89, 2.07, ノコギリモク（葉）1.71, 1.59, クロメ（葉）0.95~1.82, 0.88~2.15であった。クロメについては場所による違いが極めて大きい、これらの値を見る限り、アナアオサを除き強度の窒素制限を示唆する値は少なく、深刻な栄養塩制限下にあるとは考えにくい。周年を通じた藻場の海藻の栄養状態の調査は今後の課題であり、栄養塩を含む環

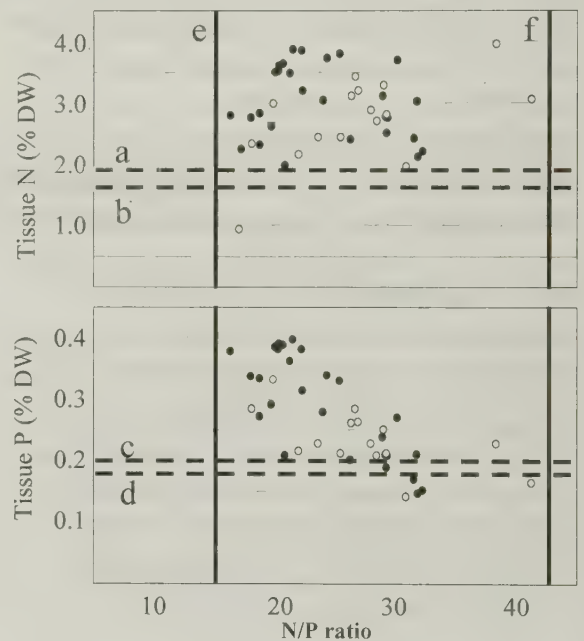


Fig. 11. Tissue N and P contents of macroalgae in *Sargassum* beds in Hiroshima Bay. ●; Fuciales, ○; other species. Dashed lines indicate critical tissue N and P levels in Table 3, a; mean critical N of all species (1.9), b; mean critical N of 6 Fuciales species (1.6), c; mean critical P of all species (0.20), d; mean critical P of 6 Fuciales species (0.18). Vertical lines indicates mean NP ratio of Atlantic and Pacific temperate macroalgae (e) and sub-tropical macroalgae (f) by Wheeler and Björnstör (1992).

境、植生のモニタリングを継続して行っていくことが必要である。

第5章 今後の課題

高度経済成長時代の瀬戸内海では、アマモ場をはじめとする藻場の消失とともに、1970年代に大分県沿岸や山口湾などの周防灘でアオサ類によるグリーンタイドが起こるようになり (Uno *et al.*, 1983), 沿岸開発・富栄養化の影響が顕在化した。広島湾でグリーンタイドが大きな社会問題化となったのは1990年代に入ってからであり (Uchimura *et al.*, 2004), 富栄養化が最も進行した時期と時間的なずれがある。したがって広島湾のグリーンタイドの発生については、他の何らかの要因が引き金になっている可能性もあるが、本報告でレビューしたようにアオサ類の増殖には高レベルの栄養塩濃度が必要条件であることは言うまでもない。近年、周防灘のアオサ類は減少し、また2000年代に入ってから広島湾のグリーンタイドも収束傾向にあり (吉田, 未発表), やはり高度経済成長時代の海域の肥沃化を背景として発展してきたノリ養殖における生産量の時間的な推移と合致している。ノリとアオサは、一方は産業上重要種、一方は害藻であり、その社会的な価値は全く異なるが、ともに成長が早く高栄養塩要求性という共通した特性を有している。近年の瀬戸内海の栄養塩濃度は、このような特性を有する海藻の高密度の増養殖には不適なレベルになりつつあると考えられる。

一方、大型の海藻・海草類による藻場はアマモ場を中心に近年回復の兆しが見られる海域もある (鈴木, 2006)。本報文で論じてきたように、広島湾全体の栄養塩レベルは他海域と比較しても必ずしも高いものではないが、ホンダワラ類をはじめとする海藻類にとって栄養塩が大幅に不足しているという状況では無い。少なくとも現在の広島湾ひいては瀬戸内海の栄養塩濃度は、藻場の海藻類の一次生産にとって十分適正レベルの範囲内にあると考えられる。むしろ、植物プランクトンや付着珪藻など葉上微細藻類の増加が海藻類の成長を妨げる場合があり (吉田ら, 2008), 今後栄養塩レベルの低下がより栄養要求性の高いこれらの微細藻類の増殖を抑え、海藻類の一次生産に有利に作用する可能性もある。

瀬戸内海ではノリ・ワカメなどの海藻類の養殖だけでなく、プランクトンによる高い低次生産を利用したカキ養殖やカタクチイワシなどの浮魚漁業、底生生物を対象とする小型底引き網漁業などが盛んであり、また、個々の経営体は小規模ながら多様な魚種を漁獲

対象とした藻場周辺を漁場とする漁業も存在する (林ら, 1965)。これらの多様な漁業ではそれぞれの生産の基礎となる一次生産者が異なっており、望ましい栄養塩環境についても若干相違があるものと考えられる。最後に、今後も瀬戸内海においてこれらの多様な漁業が共存していくためにどのような環境を維持すべきか、一次生産の観点から取り組むべき研究課題について述べる。

まず、それぞれの一次生産者の漁業生産における機能を定量的に評価し、それぞれで維持すべき一次生産のレベルを明らかにすることが必要である。特に藻場は水産生物の育成に極めて重要とされているが、その漁業生産における寄与の定量評価は進んでいない。藻場の寄与の形態は、海藻類が直接餌料として利用される場合や、その物理構造により水産生物に住み場や逃避場、産卵場を提供する場合など極めて多様である。また、藻場に依存する多くの水産生物も藻場には常在せず、生活史の一時期のみ何らかの形で活用しているものが多い。水産生物の育成において藻場が関わる諸々のプロセスを解明し、漁業生産の中に潜在する藻場の寄与を定量化することを通じて、維持すべき藻場の生産力・規模を明らかにすることが必要である。また、近年、安定同位体を用いた手法により葉上や底生性の付着微細藻類の餌料としての重要性が示唆されている (高井ら, 2003)。しかし、付着微細藻類の年間生産量や水産生物による利用機構等については海藻・植物プランクトンと比較して不明な点が多く、今後その生態的な役割と漁業生産における寄与を解明していく必要がある。

次に、栄養塩濃度をはじめとする様々な環境要因を組み込んだそれぞれの一次生産者による生産力モデルの構築が必要である。このようなモデルにより、対象となる一次生産者の生産力の維持に望ましい環境条件を明らかにし、今後予想される沿岸域の環境変動にともなう一次生産力の変化を予測することが可能となる。さらに、海藻類と植物プランクトン、付着珪藻などの葉上微細藻類では、栄養塩や光など成長・増殖に必要な資源において競合関係にあり、一方の生産力の増加は他方の生産力の減少に繋がることもあると考えられる。一次生産者間の相互作用についてもその動態をモデル化し、上述した個々の生産者の機能も考慮しつつ、漁業生産において適正な一次生産の「量的バランス」について解明することが必要である。

近年、瀬戸内海では漁獲量の低迷とあいまって、総量規制に見られるこれまでの一律な環境保全ではなく、海域の利用目的に応じた栄養塩レベルの策定など、生物生産の向上と両立したより柔軟な環境保全のあ

り方が求められるようになった(多田, 2008; 山崎 2008)。瀬戸内海は複数の灘に分かれており, それぞれの環境特性に応じた多様な水産業が成立している。それぞれの海域においてどのような漁業を軸として水産業を振興させていくのか明確な行政的ビジョンが示されることが必要であり, 研究サイドはそのために維持すべき海洋環境について明確に示す必要がある。また, 引き続き, 栄養塩, 藻場の分布, 海域の生産力などについてきめ細かいモニタリングを継続すること, そのための体制を維持・強化していくことが不可欠である。

謝 辞

本研究は平成18年度運営費交付金プロジェクト研究「内湾域の水産業に対する適正栄養塩レベルの現状把握と適正資源管理手法の開発」の一環として実施した。本報文の取りまとめにあたり, 最後まで御鞭撻いただいた(独)水産総合研究センター養殖研究所の山崎誠生産システム研究部長に御礼申し上げる。また, 海藻による栄養塩吸収と海水流動の関係については, 同センター水産工学研究所の川俣茂博上に御教授いただいた。ここに御礼申し上げる。

文 献

- Anderson, M. R., Cardinal, A., and Larochelle, J., 1981: An alternate growth pattern for *Laminaria longicruris*. *J. Phycol.*, **17**, 405-411.
- Asare, S. O. and Harlin, M. M., 1983: Seasonal fluctuations in tissue nitrogen for five species of perennial macroalgae in Rhode Island Sound. *J. Phycol.*, **19**, 254-257.
- Atkinson, M. J. and Smith, S. V., 1983: C:N:P ratios of benthic marine plants. *Limnol. Oceanogr.*, **28**, 568-574.
- Birch, P. B., Gordon D.M., and McComb, A.J., 1981: Nitrogen and phosphorus nutrition of *Cladophora* in the Peel-Harvey estuarine system, western Australia. *Bot. Mar.*, **24**, 381-387.
- Bird, K. T., 1976: Simultaneous assimilation of ammonium and nitrate by *Gelidium nudifrons* (Gelidiales: Rhodophyta). *J. Phycol.*, **12**, 238-241.
- Bird, K. T., Habig, C., and DeBusk, T., 1982: Nitrogen allocation and storage patterns in *Gracilaria tikvahiae* (Rhodophyta). *J. Phycol.*, **18**, 344-348.
- Björnsäter, B. R. and Wheeler P. A., 1990: Effect of nitrogen and phosphorus supply on growth and tissue composition of *Ulva fenestrata* and *Enteromorpha intestinalis* (Ulvales, Chlorophyta). *J. Phycol.*, **26**, 603-611.
- Campbell, S.J., Bite, J.S., and Burridge, T.R., 1999: Seasonal patterns in the photosynthetic capacity, tissue pigment and nutrient content of different developmental stages of *Undaria pinnatifida* (Phaeophyta: Laminariales) in Port Phillip Bay, south-eastern Australia. *Bot. Mar.*, **42**, 231-241.
- Chapman, A. R. O. and Craigie, J. S., 1977: Seasonal growth in *Laminaria longicruris*: Relations with dissolved inorganic nutrients and internal reserves of nitrogen. *Mar. Biol.*, **40**, 197-205.
- Chapman, A. R. O. and Lindley, J. E., 1980: Seasonal growth of *Laminaria solidungula* in the Canadian high arctic in relation to irradiance and dissolved nutrient concentrations. *Mar. Biol.*, **57**, 1-5.
- Chapman, A. R. O., Markham, J. W., and Lüning, K., 1978: Effects of nitrate concentration on the growth and physiology of *Laminaria saccharina* (Phaeophyta) in culture. *J. Phycol.*, **14**, 195-198.
- Chopin, T., Hourmant, A., Floc'h, J.-Y., and Penot, M., 1989: Seasonal variations of growth in the red alga *Chondrus crispus* on the Atlantic French coasts. II. Relations with phosphorus concentration in seawater and internal phosphorylated fractions. *Can. J. Bot.*, **68**, 512-517.
- Conolly, N. J. and Drew, E. D., 1985: Physiology of *Laminaria* III. Effect of a coastal eutrophication gradient on seasonal patterns of growth and tissue composition in *L. digitata* Lamour. and *L. saccharina* (L.) Lamour. *P.S.Z.N.I. Marine Ecology*, **6**, 181-195.
- Dean, T. A. and Jacobsen, F. R., 1984: Growth of juvenile *Macrocystis pyrifera* (Laminariales) in relation to environmental factors. *Mar. Biol.*, **83**, 301-311.
- DeBoer, J. A., Guigli, H. J., Israel, T. L. and D'Elia, C. F., 1978: Nutritional studies of two red algae. I. Growth rate as a function of nitrogen source and concentration. *J. Phycol.*, **14**, 261-266.
- De Casabianca, M.-L. and Posada, F., 1998: Effect of environmental parameters on the growth of *Ulva rigida* (Thau Lagoon, France). *Bor. Mar.*,

- 41, 157-165.
- Delgado, O. and Lapointe, B. E., 1994: Nutrient-limited productivity of calcareous versus fleshy macroalgae in a eutrophic, carbonate-rich tropical marine environment. *Coral Reefs*, **13**, 151-159.
- D'Elia, C. F. and DeBoer, J. A., 1978: Nutritional studies of two red algae. II. Ammonium and nitrate uptake. *J. Phycol.*, **14**, 266-272.
- 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所, 2005: 瀬戸内海ブロック浅海定線調査観測30年成果集, pp.197.
- 道津光生, 野村浩貴, 太田雅隆, 岩倉裕二, 1999: 北海道南西部沿岸の磯焼け海域におけるホソメコンブ群落の形成要因について. *日水誌*, **65**, 216-222.
- Duarte, C. M., 1992: Nutrient concentration of aquatic plants. *Limnol. Oceanogr.*, **37**, 882-889.
- Espinoza, J. and Chapman A. R. O., 1983: Ecotypic differentiation of *Laminaria longicruris* in relation to seawater nitrate concentration. *Mar. Biol.*, **74**, 213-218.
- Flores-Moya, A., Fernandez, A. and Niell, F.X., 1995: Seasonal variations of photosynthetic pigments, total C, N, and P content, and photosynthesis in *Phyllariopsis purpurascens* (Phaeophyta) from the strait of Gibraltar. *J. Phycol.*, **31**, 867-874.
- Fujita, R. M., 1985: The role of nitrogen status in regulating transient ammonium uptake and nitrogen storage by macroalgae. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **92**, 283-301.
- Fujita, R. M. and Goldman, J. C., 1985: Nutrient flux and growth of the red alga *Gracilaria tikvahiae* McLachlan (Rhodophyta). *Bot. Mar.*, **28**, 265-268.
- Fujita, R. M., Wheeler, P. A. and Edwards, R. L., 1989: Assessment of macroalgal nitrogen limitation in a seasonal upwelling region. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **53**, 293-303.
- Gagné, J. A., Mann, K. H., and Chapman, A. R. O., 1982: Seasonal patterns of growth and storage in *Laminaria longicruris* in relation to differing patterns of availability of nitrogen in the water. *Mar. Biol.*, **69**, 91-101.
- Gao, K. and Nakahara, H., 1990: Effects of nutrients on the photosynthesis of *Sargassum thunbergii*. *Bot. Mar.*, **33**, 375-383.
- 高坤山, 有賀祐勝, 浅田浩二, 石原利章, 赤野 徹, 清原正高, 1992: 流水条件下における紅藻スサビノリのCO₂固定の促進効果. *藻類*, **40**, 397-400.
- Gendron, L., 1989: Seasonal growth of the kelp *Laminaria longicruris* in Baie des Chaleurs, Québec, in relation to nutrient and light availability. *Bot. Mar.*, **32**, 345-354.
- Gerard, V. A., 1982a: Growth and utilization of internal nitrogen reserves by the giant kelp *Macrocystis pyrifera* in a low-nitrogen environment. *Mar. Biol.*, **66**, 27-35.
- Gerard, V. A., 1982b: *In situ* water motion and nutrient uptake by the giant kelp *Macrocystis pyrifera*. *Mar. Biol.*, **69**, 51-54.
- Gerard, V. A., 1982c: *In situ* rates of nitrate uptake by giant kelp, *Macrocystis pyrifera* (L.) C. Agardh: Tissue differences, environmental effects, and predictions of nitrogen-limited growth. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **62**, 211-224.
- Gerloff, G. C. and Krombholz, P. H., 1966: Tissue analysis as a measurement of nutrient availability for the growth of angiosperm aquatic plants. *Limnol. Oceanogr.*, **11**, 529-537.
- Gordon, D. M., Birch, P. B., and McComb, A. J., 1981: Effects of inorganic phosphorus and nitrogen on the growth of an estuarine *Cladophora* in culture. *Bot. Mar.*, **24**, 93-106.
- Haines, K. C. and Wheeler, P. A., 1978: Ammonium and nitrate uptake by the marine macrophytes *Hypnea musciformis* (Rhodophyta) and *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyta). *J. Phycol.*, **14**, 319-324.
- Hanisak, M. D., 1979a: Growth patterns of *Codium fragile* ssp. *tomentosoides* in response to temperature, irradiance, salinity, and nitrogen source. *Mar. Biol.*, **50**, 319-332.
- Hanisak M. D., 1979b: Nitrogen limitation of *Codium fragile* ssp. *tomentosoides* as determined by tissue analysis. *Mar. Biol.*, **50**, 333-337.
- Hanisak, M. D., 1983: The nitrogen relationships of marine macroalgae, in "Nitrogen in the marine environment" (ed. by Carpenter, E. J. and Capone, D. G.), Academic Press, Inc., pp. 699-730.
- Hanisak, M. D. and Harlin, M. M. 1978: Uptake of inorganic nitrogen by *Codium fragile* subsp. *tomentosoides* (Chlorophyta). *J. Phycol.*, **14**, 450-454.
- Harlin, M. M. and Craigie, J. S., 1978: Nitrate uptake

- by *Laminaria longicuris* (Phaeophyta). *J. Phycol.*, **14**, 464-467.
- Harrison, P. J., Druehl, L. D., Lloyd, K. E., and Thompson, P. A., 1986: Nitrogen uptake kinetics in three year-classes of *Laminaria groenlandica* (Laminariales: Phaeophyta). *Mar. Biol.*, **93**, 29-35.
- 橋本俊也, 松田治, 山本民次, 米井好美, 1994: 広島湾の海況特性-1989~1993年の変動と平均像-. *J. Fac. Appl. Biol. Sci. Hiroshima Univ.*, **33**, 9-19.
- 林知夫, 北森良之介, 長谷川彰, 水戸敏, 1965: 工業化と資源問題. 内海区水産研究所刊行物 C 輯, 47-75.
- Healey, F. P., 1980: Slope of the Monod equation as an indicator of advantage in nutrient competition. *Microb. Ecol.*, **5**, 281-286.
- Hernández, I., Corzo, A., Gordillo, F. J., Robles, M. D., Saez, E., Fernández, J. A., and Niell F. X., 1993a: Seasonal cycle of the gametophytic form of *Porphyra umbilicalis*: nitrogen and carbon. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **99**, 301-311.
- Hernández I., Fernández, J. A., and Niell, F. X., 1993b: Influence of phosphorus status on the seasonal variation of alkaline phosphatase activity in *Porphyra umbilicalis* (L.) Kützinger. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **173**, 181-196.
- 平岡喜代典, 後藤義雄, 寺脇利信, 岡田光正, 2001: 自然的要因によるアマモ場の消滅-氾濫河川からの浮泥供給による消滅事例の解析-. 水環境学会誌, **24**, 153-158.
- Hurd, C. L., 2000: Water motion, marine macroalgal physiology, and production. *J. Phycol.*, **36**, 453-472.
- Hurd, C. L. and Dring, M. J., 1990: Phosphate uptake by intertidal algae in relation to zonation and season. *Mar. Biol.*, **107**, 281-289.
- Hurd, C. L. and Stevens, C. L., 1997: Flow visualization around single- and multiple-bladed seaweeds with various morphologies. *J. Phycol.*, **33**, 360-367.
- Hurd, C. L., Durante, K. M., Chia, F.-S., and Harrison, P. J., 1994: Effect of bryozoan colonization on inorganic nitrogen acquisition by the kelps *Agarum fimbriatum* and *Macrocystis integrifolia*. *Mar. Biol.*, **121**, 167-173.
- Hurd, C. L., Galvin, R. S., Norton, T. A., and Dring, M. J., 1993: Production of hyaline hairs by intertidal species of *Fucus* (Fucales) and their role in phosphate uptake. *J. Phycol.*, **29**, 160-165.
- Hurd, C. L., Harrison, P. J., and Druehl, L. D., 1996: Effect of seawater velocity on inorganic nitrogen uptake by morphologically distinct forms of *Macrocystis integrifolia* from wave-sheltered and exposed sites. *Mar. Biol.*, **126**, 205-214.
- Hwang, R.-L., Tsai, C.-C., and Lee, T.-M., 2004: Assessment of temperature and nutrient limitation on seasonal dynamics among species of *Sargassum* from a coral reef in southern Taiwan. *J. Phycol.*, **40**, 463-473.
- Jackson, G. A., 1977: Nutrients and production of giant kelp, *Macrocystis pyrifera*, off southern California. *Limnol. Oceanogr.*, **22**, 979-995.
- 環境庁自然保護局, 財団法人海中公園センター, 1994: 第4回自然環境保全基礎調査 海域生物環境調査報告書(干潟, 藻場, サンゴ礁調査) 第2巻 藻場. pp. 400.
- 川井唯史, 岡直宏, 平岡雅規, 四ツ倉典滋, 中明幸広, 2004: ホソメコンブ配偶体の生長に及ぼす硝酸塩の影響. 水産工学, **41**, 35-38.
- Koehl, M. A. R. and Alberte, R. S. 1988: Flow, flapping, and photosynthesis of *Nereocystis luetkeana*: a functional comparison of undulate and flat blade morphologies. *Mar. Biol.*, **99**, 435-444.
- 工藤孝浩, 1999: 第3章 静穏な海域で栄養繁殖する種, 3-2. 横浜市海の公園では, 「アオサの利用と環境修復」(能登谷正浩編著), 成山堂書店, 東京, pp. 55-70.
- Lapointe, B. E., 1981: The effects of light and nitrogen on growth, pigment content, and biochemical composition of *Gracilaria foliifera* V. *angustissima* (Gigartinales, Rhodophyta). *J. Phycol.*, **17**, 90-95.
- Lapointe, B. E., 1986: Phosphorus-limited photosynthesis and growth of *Sargassum natans* and *Sargassum fluitans* (Phaeophyceae) in the western North Atlantic. *Deep-Sea Research*, **33**, 391-399.
- Lapointe, B. E., 1987: Phosphorus- and nitrogen-limited photosynthesis and growth of *Gracilaria tikvahiae* (Rhodophyceae) in the Florida Keys: an experimental field study. *Mar. Biol.*, **93**, 561-568.
- Lapointe, B. E., 1989: Macroalgal production and

- nutrient relations in oligotrophic areas of Florida Bay. *Bull. Mar. Sci.*, **44**, 312-323.
- Lapointe, B. E., 1995: A comparison of nutrient-limited productivity in *Sargassum natans* from neritic vs. oceanic waters of the western North Atlantic Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **40**, 625-633.
- Lapointe, B. E., 1997: Nutrient thresholds for bottom-up control of macroalgal blooms on coral reefs in Jamaica and southeast Florida. *Limnol. Oceanogr.*, **42**, 1119-1131.
- Lapointe, B. E. and Duke, C. S., 1984: Biochemical strategies for growth of *Gracilaria tikvahiae* (Rhodophyta) in relation to light intensity and nitrogen availability. *J. Phycol.*, **20**, 488-495.
- Lapointe, B. E. and O'Connell, J., 1989: Nutrient-enhanced growth of *Cladophora prolifera* in Harrington Sound, Bermuda: Eutrophication of a confined, phosphorus-limited marine ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **28**, 347-360.
- Lapointe, B. E. and Ryther, J. H., 1979: The effects of nitrogen and seawater flow rate on the growth and biochemical composition of *Gracilaria foliifera* var. *angustissima* in mass outdoor cultures. *Bot. Mar.*, **22**, 529-537.
- Lapointe, B. E. and Tenore, K. R., 1981: Experimental outdoor studies with *Ulva fasciata* Delile. I. Interaction of light and nitrogen on nutrient uptake, growth, and biochemical composition. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **53**, 135-152.
- Lapointe, B. E., Littler, M. M., and Littler, D.S., 1987: A comparison of nutrient-limited productivity in macroalgae from a Caribbean barrier reef and a from a mangrove ecosystem. *Aquat. Bot.*, **28**, 243-255.
- Lapointe, B. E., Littler, M. M., and Littler, D. S., 1992a: Nutrient availability to marine macroalgae in siliciclastic versus carbonate-rich coastal waters. *Estuaries*, **15**, 75-82.
- Lapointe, B. E., Littler, M. M., and Littler, D.S., 1992b: Modification of benthic community structure by natural eutrophication: the Belize Barrier Reef. *Proc. 7th Int. Coral Reef Symp.*, **1**, 323-334.
- Lapointe, B. E., Littler, M. M., and Littler, D. S., 1997: Macroalgal overgrowth of fringing coral reefs at Discovery Bay, Jamaica: bottom-up versus top-down control. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, **1**, 927-932.
- Larned, S. T., 1998: Nitrogen-versus phosphorus-limited growth and sources of nutrients for coral reef macroalgae. *Mar. Biol.*, **132**, 409-421.
- Larned, S. T. and Atkinson, M. J., 1997: Effects of water velocity on NH_4 and PO_4 uptake and nutrient-limited growth in the macroalga *Dictyosphaeria cavernosa*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **157**, 295-302.
- Larned, S. T. and Stimson, J., 1996: Nitrogen-limited growth in the coral reef chlorophyte *Dictyosphaeria cavernosa*, and the effect of exposure to sediment-derived nitrogen on growth. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **145**, 95-108.
- Lavery, P. S. and McComb, A. J., 1991a: Macroalgal-sediment nutrient interactions and their importance to macroalgal nutrition in a eutrophic estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **32**, 281-295.
- Lavery, P. S. and McComb, A. J., 1991b: The nutritional eco-physiology of *Chaetomorpha linum* and *Ulva rigida* in Peel Inlet, western Australia. *Bot. Mar.*, **34**, 251-260.
- Lavery, P. S., Lukatelich, R. J., and McComb, A. J., 1991: Changes in the biomass and species composition of macroalgae in a eutrophic estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **33**, 1-22.
- Littler, M. M. and Arnold, K. E., 1982: Primary productivity of marine macroalgal functional-form groups from southwestern north America. *J. Phycol.*, **18**, 307-311.
- Littler, M. M. and Littler, D.S., 1980: The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: field and laboratory tests of a functional form model. *Am. Nat.*, **116**, 25-44.
- Littler, M. M., Littler, D.S., and Taylor, P. R., 1983: Evolutionary strategies in a tropical barrier reef system: functional-form groups of marine macroalgae. *J. Phycol.*, **19**, 229-237.
- Littler, M. M., Littler, D. S., and Titlyanov, E. A., 1991: Comparisons of N- and P-limited productivity between high granitic islands versus low carbonate atolls in the Seychelles Archipelago: a test of the relative-dominance paradigm. *Coral reefs*, **10**, 199-209.

- Lyngby, J. E., 1990: Monitoring of nutrient availability and limitation using the marine macroalga *Ceramium rubrum* (Huds.) C. Ag. *Aquat. Bot.*, **38**, 153-161.
- 町口裕二, 三本菅善昭, 岡田行親, 1985: 再生期におけるナガコンブの無機態窒素吸収と生長について. 北水研報告, **50**, 45-61.
- Maita, Y., Mizuta, H., and Yanada, M., 1991: Nutrient environment in natural and cultivated grounds of *Laminaria japonica*. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, **42**, 98-106.
- Mann, H. H., 1972a: Ecological energetics of the seaweed zone in a marine bay on the Atlantic Coast of Canada. I. Zonation and biomass of seaweeds. *Mar. Biol.*, **12**, 1-10.
- Mann, H. H., 1972b: Ecological energetics of the seaweed zone in a marine bay on the Atlantic Coast of Canada. II. Productivity of the seaweeds. *Mar. Biol.*, **14**, 199-209.
- Mizuta, H., Maita, Y., and Kuwada, K., 1994: Nitrogen recycling mechanism within the thallus of *Laminaria japonica* (Phaeophyceae) under the nitrogen limitation. *Fish. Sci.*, **60**, 763-767.
- Mizuta, H., Maita, Y., and Yanada, M., 1992: Seasonal changes of nitrogen metabolism in the sporophyte of *Laminaria japonica* (Phaeophyceae). *Nippon Suisan Gakkaishi*, **58**, 2345-2350.
- 内海区水産研究所資源部, 1967: 瀬戸内海域における藻場の現状. 「瀬戸内海域における藻場の現状(瀬戸内海水産開発協議会編)」, pp. 21-38.
- 南西海区水産研究所, 1974: 瀬戸内海の藻場-昭和46年の現状, pp.39.
- Neish A. C., Shacklock, P. F., Fox, C. H., and Simpson, F. J., 1977: The cultivation of *Chondrus crispus*. Factors affecting growth under greenhouse conditons. *Can. J. Bot.*, **55**, 2263-2271.
- Niel, F. X., 1976: C : N ratio in some marine macrophytes and its possible ecological significance. *Bot. Mar.*, **19**, 347-350.
- 西垣友和, 八谷光介, 道家章生, 和田洋蔵, 2004: ヤツマタモク, ヨレモクの栄養塩吸収能力. 京都府立海洋センター研究報告, **26**, 21-29.
- Norton, T. A., 1982: A review of some aspects of form and function in seaweeds. *Bot. Mar.*, **25**, 501-510.
- Novaczek, I., 1984: Development and phenology of *Ecklonia radiata* at two depths in Goat Island Bay, New Zealand. *Mar. Biol.*, **81**, 189-197.
- O'Brien, M.C., 1987: Nitrogen and phosphorus uptake by *Enteromorpha prolifera* (Mull.) J.Ag. M.S. thesis, Oregon State University, Corvallis, 126pp.
- 大房 剛, 荒木 繁, 桜井武磨, 齊藤宗勝, 1977: アマノリの日周変化に関する生理的研究-I 室内培養下の藻体にみられた細胞の大きさ・生理活性および光合成色素量について. 日水誌, **43**, 245-249.
- 大野正夫, 1988: 緑藻アオサ場の季節的消長, 付着生物研究, **7**, 13-17.
- 大野正夫, 1999: 第1章 アオサと大繁殖. 「アオサの利用と環境修復(能登谷正浩編著)」. 成山堂書店, 東京, pp.1-15.
- 岡本繁好, 2008: 栄養塩とノリの色落ち被害について-兵庫県播磨灘の事例-. 「第2回瀬戸内海水産フォーラム 食卓から海をのぞむ-海の栄養と漁業-成果集」, 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所・同屋島栽培漁業センター・瀬戸内海ブロック水産試験場長会, 広島, pp.11-14.
- Parker, H. S., 1981: Influence of relative water motion on the growth, ammonium uptake and carbon and nitrogen composition of *Ulva lactuca* (Chlorophyta). *Mar. Biol.*, **63**, 309-318.
- Parker, H. S., 1982: Effects of simulated current on the growth rate and nitrogen metabolism of *Gracilaria tikvahiae* (Rhodophyta). *Mar. Biol.*, **69**, 137-145.
- Probyn, T. A. and Chapman, A. R. O., 1983: Summer growth of *Chordaria flagelliformis* (O. F. Muell.) C. Ag.: Physiological strategies in a nutrient stressed environment. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **73**, 243-271.
- Rivers, J. S. and Peckol, P., 1995: Summer decline of *Ulva lactuca* (Chlorophyta) in a eutrophic embayment: interactive effects of temperature and nitrogen availability? *J. Phycol.*, **31**, 223-228.
- Rosell, K.-S. and Srivastava, L. M., 1985: Seasonal variations in total nitrogen, carbon, and amino acids in *Macrocystis integrifolia* and *Nereocystis luetkeana* (Phaeophyta). *J. Phycol.*, **21**, 304-309.
- Rosenberg, G. and Ramus, J., 1982: Ecological growth strategies in the seaweeds *Gracilaria foliifera* (Rhodophyceae) and *Ulva* sp. (Chlorophyceae):

- soluble nitrogen and reserve carbohydrates. *Mar. Biol.*, **66**, 251-259.
- Rosenberg, G., Probyn, T. A., and Mann, K. H., 1984: Nutrient uptake and growth kinetics in brown seaweeds: response to continuous and single additions of ammonium. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **80**, 125-146.
- Ryther, J. H., Corwin, N., DeBusk, T. A., and Williams, L. D., 1981/1982: Nitrogen uptake and storage by the red alga *Gracilaria tikvahiae* (McLachlan, 1979). *Aquaculture*, **26**, 107-115.
- Schaffelke, B., 1999: Particulate organic matter as an alternative nutrient source for tropical *Sargassum* species (Fucales, Phaeophyceae). *J. Phycol.*, **35**, 1150-1157.
- Schaffelke, B. and Klumpp, D. W., 1997: Growth of germlings of the macroalga *Sargassum baccularia* (Phaeophyta) is stimulated by enhanced nutrients. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, **2**, 1839-1842.
- Schaffelke, B. and Klumpp, D. W., 1998a: Nutrient-limited growth of the coral reef macroalga *Sargassum baccularia* and experimental growth enhancement by nutrient addition in continuous flow culture. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **164**, 199-211.
- Schaffelke, B. and Klumpp, D. W., 1998b: Short-term nutrient pulses enhance growth and photosynthesis of the coral reef macroalga *Sargassum baccularia*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **170**, 95-105.
- Schramm, W., Abele, D., and Breuer, G., 1988: Nitrogen and phosphorus nutrition and productivity of two community forming seaweeds (*Fucus vesiculosus*, *Phycodrys rubens*) from the Western Baltic (Kiel Bight) in the light of eutrophication processes. *Kieler Meeresforsch.*, **6**, 221-240.
- 清木徹, 駒井幸雄, 小山武信, 永淵修, 日野康良, 村上和仁, 1998: 瀬戸内海における汚濁負荷量と水質の変遷. 水環境学会誌, **21**, 780-788.
- 芹澤如比古, 大野正夫, 1995: 土佐湾の内湾域に設置した人工礁上の海藻類の遷移. 水産増殖, **43**, 437-443.
- Serisawa, Y., Taino, S., Ohno, M., and Aruga, Y., 1998: Succession of seaweeds on experimental plates immersed during different seasons in Tosa Bay, Japan. *Bot. Mar.*, **41**, 321-328.
- Sfriso, A., 1995: Temporal and spatial responses of growth of *Ulva rigida* C. Ag. to environmental and tissue concentrations of nutrients in the lagoon of Venice. *Bot. Mar.*, **38**, 557-573.
- Sfriso, A. and Marcomini, A., 1997: Macrophyte production in a shallow coastal lagoon. Part I: Coupling with chemico-physical parameters and nutrient concentrations in waters. *Mar. Environmental Research*, **44**, 351-375.
- 島袋寛盛, 寺田竜太, 外林 純, Nishihara, G. N., 野呂忠秀, 2007: 鹿児島県薩摩半島南部における褐藻フタエモク *Sargassum duplicatum* (Fucales, Phaeophyta) の季節的消長. 日水誌., **73**, 454-460.
- 新村 巖, 武田健二, 1979: 出水干拓地先におけるアナアオサの生育試験, 昭和52年度鹿児島県水産試験場事業報告書 生物部編, 3-9.
- 新村 巖, 1979: 出水干拓地先におけるアナアオサの異常発生に関する一考察, 昭和52年度鹿児島県水産試験場事業報告書 生物部編, 10-13.
- Stimson, J., Larned, S., and McDermid, K., 1996: Seasonal growth of the coral reef macroalga *Dictyosphaeria cavernosa* (Forskål) Børgesen and the effects of nutrient availability, temperature and herbivory on growth rate. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **196**, 53-77.
- 鈴川健二, 2006: 人工基盤を用いたアマモ場造成の試み, 「第1回瀬戸内海水産フォーラム 瀬戸内海におけるアマモ場の現状と回復への取り組み-成果集」, 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所・同屋島栽培漁業センター・瀬戸内海ブロック水産試験場長会, 広島, pp.18-21.
- 社団法人瀬戸内海環境保全協会, 2007: 平成18年度瀬戸内海の環境保全 資料集. pp.103.
- 多田邦尚, 2008: 沿岸海域における栄養塩とその重要性. 「第2回瀬戸内海水産フォーラム 食卓から海をのぞむ-海の栄養と漁業-成果集」, 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所・同屋島栽培漁業センター・瀬戸内海ブロック水産試験場長会, 広島, pp.1-4.
- 高井則之, 三島康史, 星加章, 吉原喜好, 2003: 炭素・窒素安定同位体比分布から推察した安芸灘に生息する底生動物群集の炭素供給源. 水産海洋研究, **67**, 148-162.
- 玉置 仁, 西嶋 渉, 新井章吾, 寺脇利信, 岡田光正,

- 1999: アマモ生育に及ぼす葉上堆積浮泥の影響, 水環境学会誌, **22**, 663-667.
- Tarutani, K., Niimura, Y., and Uchida, T., 2004: Short-term uptake of dissolved organic nitrogen by an axenic strain of *Ulva pertusa* (Chlorophyceae) using ^{15}N isotope measurements. *Bot. Mar.*, **47**, 248-250.
- 寺脇利信, 玉置 仁, 西村真樹, 吉川浩二, 吉田吾郎, 2002: 広島湾におけるアマモ草体中の炭素および窒素総量. 水研センター研報, **4**, 25-32.
- 寺脇利信, 吉川浩二, 吉田吾郎, 内村真之, 新井章吾, 2001: 広島湾における大型海藻類の水平・垂直分布様式. 瀬戸内水研研報, **3**, 73-81.
- Thomas, T. E. and Harrison, P. J., 1985: Effects of nitrogen supply on nitrogen uptake, accumulation and assimilation in *Porphyra perforata* (Rhodophyta). *Mar. Biol.*, **85**, 269-278.
- Thomas, T. E. and Turpin, D. H., 1980: Desiccation enhanced nutrient uptake rates in the intertidal alga *Fucus distichus*. *Bot. Mar.*, **23**, 479-481.
- Thomas, T. E., Turpin, D. H., and Harrison, P. J., 1987: Desiccation enhanced nitrogen uptake rates in intertidal seaweeds. *Mar. Biol.*, **94**, 293-298.
- Topinka, J. A., 1978: Nitrogen uptake by *Fucus spiralis* (Phaeophyceae). *J. Phycol.*, **14**, 241-247.
- Topinka, J. A. and Robbins, J. V., 1976: Effects of nitrate and ammonium enrichment on growth and nitrogen physiology in *Fucus spralis*. *Limnol. Oceanog.*, **21**, 659-664.
- 内村真之, 新井章吾, 吉川浩二, 吉田吾郎, 寺脇利信, 2003: 広島湾の岩礁性藻場をつくる海藻の現存量とその季節変化. 藻類, **51**, 123-129.
- Uchimura, M., Yoshida, G., Hiraoka, M., Komatsu, T., Arai, S., and Terawaki, T., 2004: Ecological studies of green tide, *Ulva* spp. (Chlorophyta) in Hiroshima Bay, the Seto Inland Sea. *Jap. J. Phycol.*, **52** (supplement), 17-22.
- Uno, S., Sakai, Y., and Yoshikawa, K., 1983: Distribution of *Ulva pertusa* and amount of nitrogen in Yamaguchi Bay. *Jpn. J. Phycol.*, **31**, 148-155.
- Waite, T. and Mitchell, R., 1972: The effect of nutrient fertilization on the benthic alga *Ulva lactuca*. *Bot. Mar.*, **15**, 151-156.
- Wallentinus, I., 1984: Comparisons of nutrient uptake rates for Baltic macroalgae with different thallus morphologies. *Mar. Biol.*, **80**, 215-225.
- Wheeler, P. A. and Björnsäter, B. R., 1992: Seasonal fluctuations in tissue nitrogen, phosphorus, and N:P for five macroalgal species common to the Pacific northwest coast. *J. Phycol.*, **28**, 1-6.
- Wheeler, P. A. and North, W. J., 1980: Effect of nitrogen supply on nitrogen content and growth rate of juvenile *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyta) sporophytes. *J. Phycol.*, **16**, 577-582.
- Wheeler, P. A. and North, W. J., 1981: Nitrogen supply, tissue composition and frond growth rates for *Macrocystis pyrifera* off the coast of southern California. *Mar. Biol.*, **64**, 59-69.
- Wheeler, W. N., 1980: Effect of boundary layer transport on the fixation of carbon by the giant kelp *Macrocystis pyrifera*. *Mar. Biol.*, **56**, 103-110.
- Wheeler, W. N. and Srivastava, L. M., 1984: Seasonal nitrate physiology of *Macrocystis integrifolia* Bory. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **76**, 35-50.
- Wheeler, W. N. and Weidner, M., 1983: Effects of external inorganic nitrogen concentration on metabolism, growth and activities of key carbon and nitrogen assimilatory enzymes of *Laminaria saccharina* (Phaeophyceae) in culture. *J. Phycol.*, **19**, 92-96.
- Wong, S. L. and Clark, B., 1976: Field determination of the critical nutrient concentration for *Cladophora* in streams. *J. Fish. Res. Bd Can.*, **33**, 85-92.
- 山本民次, 高尾允英, 1988: スサビノリ *Porphyra yezoensis* 葉体のアンモニア態および硝酸態窒素の取り込みに及ぼす温度の影響. 藻類, **36**, 37-42.
- 山本民次, 石田愛美, 清木 徹, 2002: 太田川河川水中のリンおよび窒素濃度の長期変動-植物プランクトン種の変化を引き起こす主要因として. 水産海洋研究, **66**, 102-109.
- 山本民次, 橋本俊也, 辻けい子, 松田 治, 樽谷賢治, 2002: 1991~2000年の広島湾海水中における親生物元素の時空間的変動, 特に植物プランクトン態 C:N:P 比のレッドフィールド比からの乖離. 沿岸海洋研究, **39**, 163-169.
- 山崎 誠, 2008: 瀬戸内海の再生に向けて-漁業生産向上の視点から-. 「第2回瀬戸内海水産フォーラム 食卓から海をのぞむ-海の栄養と漁業-成果集」, 独立行政法人水産総合研究センター瀬

- 戸内海区水産研究所・同屋島栽培漁業センター・
瀬戸内海ブロック水産試験場長会，広島，pp.
35-39.
- 八谷光介，西垣友和，道家章生，和田洋蔵，2008：京
都府沿岸におけるホンダワラ科海藻の炭素・窒
素・リン含量の季節変化．藻類，**56**, 107-115.
- 吉田吾郎，新村陽子，寺脇利信，2008：堆積が藻場に
及ぼす影響．藻類，**56**, 134.
- 吉田吾郎，内村真之，吉川浩二，寺脇利信，2001：広
島湾に生育する海藻類の炭素・窒素含量とその季
節変化．瀬戸内水研研報，**3**, 53-61.
- 吉田忠生，1998：新日本海藻誌，内田老鶴圃，東京，
pp.1222.
- Zimmerman, R. C. and Kremer, J. N., 1986: *In situ*
growth and chemical composition of the giant
kelp, *Macrocystis pyrifera* : response to temporal
changes in ambient nutrient availability. *Mar.*
Ecol. Prog. Ser., **27**, 277-285.

一次生産の変化と有用種の関係 (二枚貝)

浜口 昌巳*

Relationship among primary production, marine environment and fisheries production of bivalves in the Seto Inland Sea

Masami Hamaguchi *

Abstract : The manila clam, *Ruditapes philippinarum*, is widely distributed all over Japan and the most common and commercially important shellfish in the country. The Fisheries production of Manila clam in Suo-Nada, which amounts to more than 90% of the total clam production in the Seto Inland Sea in mid-1980s. Maximum fisheries production of the clam in Suo-Nada was 41883 metric ton in 1986. However, the census shows a rapid decrease in fisheries production of the clam since 1990 and its was less than 100 metric ton in recent years.

During the course of the research on the possible reasons for the deterioration of production, we noticed lots of reasons as follows; 1) the marine environmental conditions have gradually changed since mid-1980s with global climate changes. 2) Nutrient level of the Seto Inland Sea has gradually decreased by tighter regulation of total emission of nutrient salts. 3) Overexploitation of the natural resources of the clam has rose in demand by crash of other local population.

In this review, I summarized and reanalyzed the relationship among the primary production, marine environment and fisheries production of the clam in the Seto Inland Sea. In the results, water temperature in winter was gradually increased since mid 1980s, and the fisheries production of the clam was inversely related to water temperature in winter. Similarly, nitrogen levels was gradually decreased since mid 1980s, and the fisheries production of the clam was related to concentration of the inorganic nitrogen in summer.

The fact shows that one of the possible reasons for the deterioration of the clam production would cause by changes in marine environmental conditions.

Key words : manila clam, marine environmental condition, Suo-Nada

瀬戸内海では、1973年10月瀬戸内海環境保全臨時措置法が制定され、その環境保全のため産業排水からの負荷量（COD）の削減、汚水排出施設の事前評価、埋め立て抑制などの対策が具体的に進められてきており、一定の成果を見ている。しかし、近年、アサリの漁獲量の減少やノリの色落ちに見られるように、海域の生産力が低下しているのではないかという指摘があり、一律削減のみが目標とされてきたCODや各種栄養塩類の総量規制基準についても、第七次水質総量規

制（中央環境審議会水環境部会）では、沿岸域の生物生産を維持するための適正栄養塩レベルの把握やその維持について配慮がなされる予定である。

このような動きのなか、瀬戸内海区水産研究所では、平成18年度地域連携プロジェクト研究「内湾域の水産業に対する適正栄養塩レベルの現状把握と適正資源管理手法の開発 (Feasibility study)」により、漁業生産、生態系と栄養塩の関係について検討した。一般に、海域の栄養塩と漁業の関係を調べるには、魚類などの移

2010年8月30日受理 (Received on August 30, 2010)

*独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所 〒739-0452 広島県廿日市市丸石2-17-5

(National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency, 2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, Japan)

動分散能力の高い高次の生産者より、一次生産者を直接餌料として活用するろ過食性二枚貝の漁獲量との関係を解析する方が明瞭になると考えられる。そこで、藻場・干潟環境研究室ではろ過食性二枚貝に注目し、瀬戸内海の栄養塩と漁獲量の関係を解析した。ろ過食性二枚貝類のなかでも代表的な漁獲対象種であるアサリをみると、瀬戸内海全体の漁獲量は1985-6年にピークに達し、その当時の全国の漁獲量の1/3程度を占めていたが、その約9割が周防灘で漁獲されていた。現在、全国のアサリ漁獲量は減少したといわれているが、図1に示すとおり全国では最盛期と比較して1/4程度となっている。しかし、地域別に見てみると減少の程度には大きな差があり、例えば、熊本県では最も漁獲量が少なかった年でも最大漁獲量の1/65であるのに対し、周防灘沿岸地域は1985年には最大41,883トンであったが、2007年の統計では山口、福岡（周防灘沿岸部）、大分3県合計で274トンとなり、過去の最大漁獲量の1/153と、かつて1万トン以上の漁獲量が記録されている漁場のなかでは全国一の減少率を示す。したがって、周防灘でアサリが採れていた時期と現在の状況を比較検討することは、全国規模で起こっているアサリ減少原因を考える上で重要な知見が得られるのではないかと考えられる。また、松川ら（2008）はアサリの資源減少は高度経済成長期の干潟や海岸開発による埋め立てと、その後の過剰漁獲が主要原因であると報告している。この点については同意できるが、気候変動や環境変動の関係についての記述は、これらがそれぞれの海域によって異なる挙動を示すために、同意できない部分がある。特に、瀬戸内海では、東京湾や三河湾と異なり、栄養塩と温暖化に伴う動物相の変化が顕著である（例えば、山本、2005；薄、2007；重田2008）。したがって、アサリ等の資源変動要因を考える際には、その過程を説明するためにも海洋環境の変化との関係を詳細に解析する必要がある。

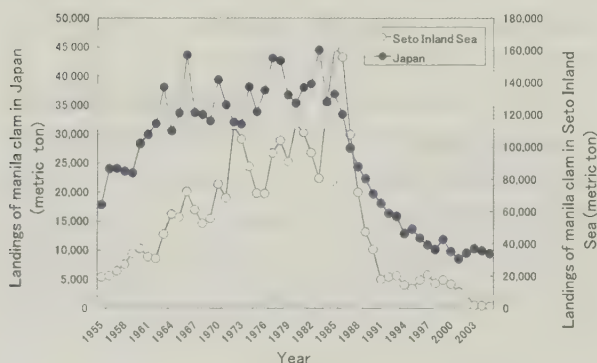


Fig.1. Fisheries production of Manila clam in Japan and the Seto Inland Sea from 1955 to 2006.

そこで、本研究では、我が国の代表的な内海域である瀬戸内海最大のアサリ、ハマグリ、バカガイ等の二枚貝漁業漁場であった周防灘に焦点をあて、海洋環境に関する文献レビューを行うと共に、浅海定線観測調査によって得られた長期モニタリングデータおよび瀬戸内海区水産研究所、山口県、大分県、福岡県、広島大学、愛媛大学の合同調査データを活用し、各種海洋環境の変遷とアサリの漁獲量の関係を検討した。次いで、現在、周防灘をはじめ各地で実施されているアサリ資源を回復させるための様々な試みについて説明する。

なお、この原稿は藻場・干潟環境研究室が取り組んでいる周防灘の海洋環境とアサリの生産性についての解析のうちの最初の取りまとめ分であり、すでに公表されている、周防灘の河口干潟と山や川の関係（浜口ら、2008）、多変量解析をベースとしたパス解析による海洋環境とアサリの生産性の関係解析（浜口ら、2009）はこの原稿に続く解析結果である。

1. 周防灘の海洋環境に関する文献レビュー

【周防灘の地理的位置および構造】周防灘の地形や構造は、最近では岩男（2001）に詳しく記載されている。それによると周防灘は瀬戸内海西部に位置し、伊予灘と隣接するとともに関門海峡を通じて日本海と、豊後水道を通じて太平洋とつながる平均水深は23.7m、総面積3,100km²の海域である。周防灘西部の海域は豊前海と呼ばれる場合もある。沿岸部は、山口県と大分県のそれぞれの東部海域では岩礁域が見られる他は、ほとんどは勾配の緩やかな海岸地形であり、広大な干潟が形成されている。

海洋環境は外海水の通過量の多い豊後水道に接する伊予灘の影響を受けやすいが、半閉鎖的な海域である。潮流に関しては多くの研究（柳・樋口、1979；神蘭ら、1991；Balotro *et al.*, 2002；2003）があり、上げ潮時には西流、下げ潮時は東流となる流速の穏やかな流れがあるとされている。また、伊予灘から残差流として流入し、灘北部を西流し、その後反時計回りの流れとなり、国東半島沖を東流し、別府湾に至る還流がある。いっぽう、反時計回りになった流れの一部は時計回りの流れとなり、福岡県・大分県の沿岸域を北流する流れもあるといわれているが、この流速も穏やかである。

風向は冬季には北から西の風が、夏期には東から南東の風が卓越している。また、海底の地質は、干潟域は砂質であるが、その他は砂泥質から泥質である。また、図2に周防灘の海域特性による区分を示す。海域Ⅰは豊後水道外洋系水、海域Ⅱは灘固有混合水、海域

Ⅲは山口県混合水、海域Ⅳは福岡・大分県混合水、海域Ⅴは北九州市や関門海峡外混合水であり、それぞれの負荷源等が異なる水系と考えられている。外海水の影響については豊後水道から伊予灘を經由しての影響が大きく、これによって周防灘の栄養塩および水温が影響を受けるといわれており、周防灘の栄養塩の約半分が外海起源と考えられている(藤原ら, 1997; 武岡, 1999; 武岡ら, 2002; 藤原ら, 2003)。また、豊後水道を通じて周防灘に侵入する外海水は黒潮の離接岸と関係しており、黒潮が接岸しているときは外海水の侵入量が多く、低水温で栄養塩濃度の高い外海水が浸入するとされており(兼田ら, 2002), Takashi *et al.*, (2006) が調べた紀伊水道とは異なる挙動を示す。

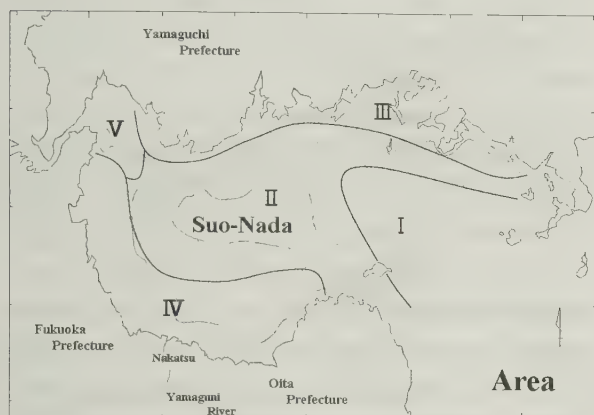


Fig. 2. Location and Sea area of the Suo-Nada

【周防灘の海洋環境】周防灘の海洋環境や一次生産については、1972年に始まった漁海況予報事業の浅海定線調査(以下、浅海定線とする。各県の浅海定線調査報告書、瀬戸内海区水産研究所, 2006)の他に、水産研究所並びに大学等の研究者によるものがある(山口・安楽, 1984; 武岡, 1985; 平田ら, 1987; 藤原ら, 1997; 橋本ら, 1997; 清木ら, 1998; 武岡, 1999; 門谷ら, 2002; 林・柳, 2002; Sarker *et al.*, 2005)。これらの研究から周防灘の海洋環境の特徴を抜粋してみると以下ようになる。

周防灘では、河川からの流入量が少ないために、栄養塩は底層からの溶出(山本ら, 1998; Tada and Montani, 2002)や伊予灘(科学技術庁, 1985; 湯浅, 1993)や豊後水道からの外海水の入り込みによって供給される場合が多く、一次生産は栄養塩の量よりも日射量に制限を受けている。また、このような栄養塩の供給機構により植物プランクトンに代表されるクロロフィルa量は表層より底層に多く、プランクトン生産が他の海域と比較して相対的に底生生物生産に転送さ

れ易い特徴を備えており、それが周防灘の特徴である豊富な貝類や底生生物資源を支えていたのではないかと考えられている(松田, 1996, 上1996)。また、門谷ら(2002)やYamaguchi *et al.*, (2007)は、周防灘は浅く、底層まで光が到達できるので、底層の付着珪藻類の増殖が良好であるため、そのことが周防灘のベントス類の生産に寄与しており、この海域の特徴および生物生産構造は、過去の東京湾に近いとしている。

一方、周防灘の海洋環境の変遷については、先に述べた浅海定線によって継続的に集積されたデータについて、調査期間や水温、塩分、栄養塩類等の項目毎に分けた詳細な解析によって明らかにされている(田森ら, 1986; 神蘭ら, 1988; 吉岡ら, 1987; 寺田・神蘭, 1984; 岩男, 2001; 岩野ら, 2001; 和西, 2004; 和西ら, 2006)。特に、福岡県の豊前海研究所では浅海定線調査によって得られたデータを10年、20年単位で詳細に分析しており、このような情報は周防灘においてかつてアサリの漁獲量の多い時期と、現在の海洋環境を比較検討する上で極めて有用である。片山・神蘭(2000)は周防灘西部(豊前海)の浅海定線によって得られた24年間のデータを解析するとともに、同海域の基礎生産量をクロロフィルa量を基に算定し、魚類や貝類の漁獲量との関係を論じている。これによると、周防灘の基礎生産力は北部海域が高く、ついで、南部、沖合い域の順となる。この中で、福岡県沿岸の周防灘西部海域(豊前海)の基礎生産力は、同海域でのアサリの漁獲量がピークに達する1986年以前の1974年から現在までほとんど変化がないことから同海域におけるアサリを中心とした採貝漁業の急激な減少は、海域の基礎生産力の低下による餌不足等が原因ではないとしている。

一方、2005年に同海域の海洋環境および基礎生産量を独自の調査で調べた結果が報告されている(中嶋ら, 2006; 早野ら, 2006)。早野ら(2006)は、現場垂下法で調べた同海域の基礎生産量は、アサリ漁獲量がピークに達する前年である1984年に同じ方法で測定した山口・安楽(1984)の結果と比較して大差が無く、基礎生産量の減少は認められないとしており、片山・神蘭(2000)の考察を支持している。しかし、他方では片山・神蘭(2000)は、他の海域で基礎生産力を算出した他の論文を引用して周防灘西部海域の基礎生産力と比較し、同海域の基礎生産力は東京湾の1/7、三河湾の約半分であるとしており、周防灘のアサリの漁獲量を支える基礎生産力は、東京湾や三河湾より低く、これらの海域より餌料条件が制限要因となる可能性も示唆している。このことは、東京湾や三河湾のアサリ漁獲量の減少率は周防灘より遥かに小さいことと関連

しているかもしれない

和西ら（2006）は周防灘海域の浅海定線のデータを再度解析し、栄養塩（DIN, COD）やクロロフィル a などはアサリの漁獲量の多かった1980年代半ばに比較的高い傾向を示すことを報告している。また、片山・神蘭（2000）の調査海域より南部の周防灘の浅海定線の結果を整理した岩男（2001）の報告によると、周防灘西部海域の栄養塩類は減少傾向にあり（図3）、このことが海域における植物プランクトンの量や質を変化させているのではないかとしている。アサリ成貝は餌として数～数十 mm 程度の粒子を捕摂しやすいことから、現在では、クロロフィル a 等の絶対量では捕えられず、植物プランクトンの種やサイズについて検討する必要性が指摘されている。したがって、アサリの漁獲量が多かった時期と現在では、基礎生産力は同じでも、構成する植物プランクトンの質が変化しており、アサリの餌にふさわしくない植物プランクトン等が増加しているのではないかと、という疑問が生じる。

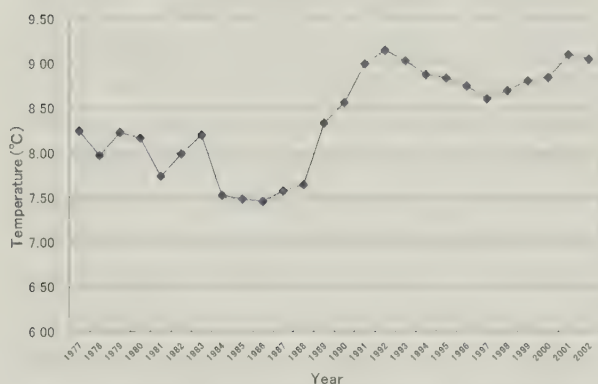


Fig.3. Running means of five-year data of water temperature during winter season in the Suo-Nada from 1975-2006.

瀬戸内海全般を見ると板倉（2001）および板倉・山口（2007）は、貝類等の餌となる珪藻類の変遷を底泥中のシスト調べることによって比較しているが、1993年と2004年の調査結果を比較すると、かつて赤潮が多発した播磨灘において *Skeletonema* から *Chaetoceros* へと優占種が変化しており、その原因のひとつとして無機栄養レベル（高い⇒低い）の変化ではないかと指摘している。また、山本ら（2002）は広島湾に流入する大田川河口の窒素濃度の長期的変動を検討し、湾内における植物プランクトンの出現種の関係について調べている。これらの報告から、アサリが沢山獲れていた時期と現在では、例えば、クロロフィル a の値は同じでも、構成する植物プランクトンの種組成が変化し

ていることが明らかである。このことは、それを利用するより高次の海産動物にとって餌の価値が変化していることを示しており、後の生物生産プロセスに大きな影響を与えるものと推測される。

周防灘でこれらを証明することは容易なことではないが、幸いなことに、周防灘西部海域での寺田・神蘭（1985）の精力的な仕事があり、周防灘のアサリの漁獲量がピークに達する直前の植物・動物プランクトンの組成が詳細に調べられている。そのため、現在、この寺田・神蘭（1985）と同レベルの調査ができれば、同海域ではアサリの漁獲量が多かった時期と、現在の植物・動物プランクトンの種組成の違いを検討することも可能であり、アサリの餌料環境と資源量の関係を考える上で重要な成果が期待される。

このほか、地図上では開放的な海域に見える周防灘でも貧酸素水塊の発生が認められており、その状況は福岡県により詳細に調べられている（例えば、磯辺ら、1993）。周防灘の貧酸素水塊の形成原因については様々な報告がある（武岡、1989；神蘭ら、1996a；神蘭ら、1996b）。近年、馬込ら（2002）は、周防灘の河川流入量の41%を占める山国川の出水と貧酸素水塊の発生には関連性があり、山国川出水から二週間後に貧酸素水塊が形成されると報告している。このような貧酸素水塊は、主に底生生物群集に影響を与えることが想像されるので、今後、詳細に検討する必要があると思われるが、周防灘における貧酸素水塊の発生は、瀬戸内海全般と同様にアサリの漁獲量が多かった時期のほうが多く（瀬戸内海区水産研究所、2006）、したがって、このことがアサリの減少要因とはなっていないと考えられる。

一方、それ以外の海洋環境の変化のなかで、瀬戸内海で顕著なのは冬季水温の上昇である（山本、2003；瀬戸内海区水産研究所、2006）。広島湾の冬季水温は1986年を境にそれ以前と比べ有意に上昇している（Ishii *et al.*, 2005）。また、周防灘でも冬季水温は1℃以上の上昇が認められている（図4；和西、2004）。ただし、冬季の水温上昇は瀬戸内海の東部と西部ではその程度が異なっており、高橋・清木（2004）は瀬戸内海の水温は1972年から2000年の間で全域的に1℃程度上昇していると報告しているが、冬季の水温は備讃瀬戸を境に西側では東側より0.5～1℃程度高いことを報告している。さらに、高橋・清木（2004）は数値モデルによる計算結果から瀬戸内海における水温上昇は、地球規模の環境変動に伴う海面熱フラックスの変化と外洋域水温の変動が非線形に重ね合わさって引き起こされたものと結論付けている。しかしながら、冬季水温の上昇はアサリの漁獲量が最も多かった

時期と比較してであり、その時期より前の1970年代も1980年代と比較すると水温が高く、10年程度の周期性を持つと考えられる(樽谷, 2007)。一般に、貝類の成熟・産卵には積算水温が影響することが知られており、このように水温条件の変化がアサリの生理的要因を変化させ、そのことが資源減少につながっている可能性がある。

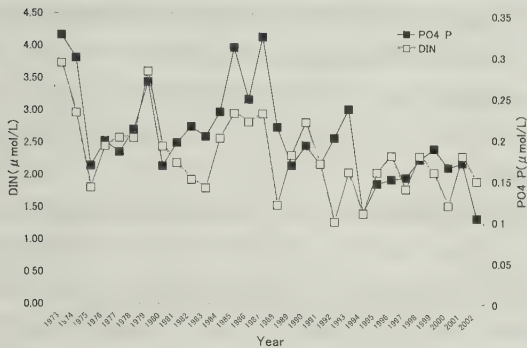


Fig.4. Running means of five-years data of dissolved inorganic nitrogen and phosphate concentrations at bottom during summer season in the Suo-Nada from 1975-2006.

さらに現在解析中であるが、アサリが獲れていた時期は、冬季水温ほどの差ではないが夏季の水温が現在と比較して低い傾向を示している。兼田ら(2002)は黒潮の離接岸が夏季の周防灘の水温に影響し、黒潮の接岸により周防灘の水温が低下するとしており、先に述べた栄養塩類の供給以外にも外洋環境の影響を強く受ける。

2002年から開始した大分県と瀬戸内海区水産研究所による中津干潟アサリの個体群動態に関する共同調査の結果では、夏季にアサリに障害輪が形成されるとともにへい死が起こっていた。アサリは水温が25℃を越えるところ過能力が低下することが知られている(Nakamura, 2004)。また、同海域における春季から夏季にかけての大潮時の下潮は日中となり、気温が最大となる時刻と一致する。そのため、干潟では気温の上昇が著しく、記録的な夏日が続くとアサリの生理活性は低下し、時にはへい死に至る。また、周防灘はこの時期強く成層しており、上層では陸水から供給がないと栄養塩は枯渇し、植物プランクトンの増殖が抑えられ、結果的にアサリの餌料が不足する。以上、2つの原因が障害輪の形成やへい死を引き起こしていると考えられる。

また、近年、雨の降り方に変化がみられ、短時間に集中的に降る傾向を示しており、保水力の弱い地質上を流れる山国川の急激な出水により干潟環境が悪化

し、これがアサリの生産を不安定にする要因となっている(浜口ら, 2008)。さらに、中津干潟では山国川のダムや堰の建設により、川から供給される水や砂が減少し、干潟の衰退等を引き起こしているのではないかと考えられている。

一方、日本近海の海水位は上昇しており、瀬戸内海でも大潮の満潮時に厳島神社が冠水するなどその影響がみられるが、これによってもアサリは影響を受ける。天野(2006)は徳山港の潮位資料と周防灘のアサリ漁獲量のデータを解析し、同海域でアサリの漁獲量が2万トンを超えるのは1965年から2002年の間の平均水位が平均潮位と比較してマイナスの時期であり、+2 cmを越えて上昇すると漁獲量が低水準となると報告している。この潮位変動は約20年周期で変動しているが、1997年の極大ののち、その後減少するはずのところが上昇傾向にあり、これまでの変化とは異なる挙動を示している。近年、中津干潟ではアサリ稚貝の着底場所が、アサリの漁獲量が多かった1980年代半ばより岸に寄っているという感想を漁業者から聞くことが多い。アサリ浮遊幼生は着底する際に、河川水による塩分勾配を利用しているといわれており(石田ら, 2005)、河川水の流量の減少と海水位の上昇が適当な塩分濃度場所を岸に寄せる結果をもたらした、これによってアサリの着底場所が岸よりになっているのではないかと推測される。このことは、先に述べた集中豪雨的な降雨により河川の出水が起これ、干潟への泥の急激な堆積を引き起こし、アサリをへい死させることにより個体群形成を不安定化させる要因となっている可能性がある。

【周防灘の二枚貝生産量の推移と問題点】周防灘沿岸はおおむね遠浅で広大な干潟が発達しており、古くからハマグリ、バカガイ、アサリ等の採貝業が盛んな海域である。これらの貝類については、山口、福岡、大分各県が毎年、県単事業等で資源量調査を行っており、以下、個々の報告を参考文献ではあげないが、まとめて周防灘の貝類漁獲量の動向を記述する。

まず、バカガイは豊凶が激しく、傾向はつかみにくい。平成元年と平成8年に大発生し、その後、大発生は認められない。これは東京湾のバカガイの生産量が約一万トンと安定しているのに対照的である。

ハマグリは豊前海の主要な漁獲対象種で、1968年までは200~300トンの生産を上げていたが、その後、アサリの漁獲量の増加に反比例して減少し、近年では1999年に241トン漁獲されていたが現在の漁獲量は少ない。

アサリの漁獲量は周防灘全体で1985年には41,883ト

ンに達し、同年のわが国アサリ漁獲量の33%を占めるにいたっている。しかし、その後急激に減少し、これまでの最低は2006年の94トンである。周防灘各県の過去のアサリの漁獲量の推移(図5)を見てみると、山口県では1964年に5,000トンを超え、1982年には8,557トンの最大の漁獲量を示した。その後、1988年まで5,000トン前後で増減を繰り返していたが、それ以降は減少に転じている。福岡県では漁獲量は1965年以降増加し、山口県と同様な傾向で増減を繰り返している。最大漁獲量は1986年の11,377トンであるが、それ以降は減少に転じている。大分県のアサリの漁獲量は1972年にそれまでの2~3,000トンから17,751トンに急増し、以降1987年まで10,000トンを境に増減を繰り返している。最大漁獲量は1985年の27,547トンであるがそれ以降は急激に減少している。また、各県の減少開始時期は概ね一致しており、1985~1988年以降である。この時期のアサリ漁業の実態は、山口県では1980年頃から潜水器漁業が開始され、漁場がこれまでの干潟から沖合域へと拡大している。山口県のアサリ漁獲量が最大となった1982年にはそのうち約1/3程度、その後は約半数が潜水器漁業によって漁獲されている。

一方、大分では漁業統計上、1984年ぐらいからポンプ漕ぎによる沖合域のアサリの漁獲が始まっており、大分県のアサリの漁獲量がピークに達する1985年の漁獲量は従来の干潟域におけるアサリの漁獲にこのポンプ漕ぎによる漁獲が加わるような形で増加している。しかし、このような沖合域アサリ漁業の開始により、漁獲量は一時的には増加しているが、それ以降周防灘全体の漁獲量は急激に減少しているようにもみえる。このことから、沖合域アサリ漁業は、幼生の供給源となっていた母貝集団を崩壊させ、周防灘全体における幼生の供給量が減少し、加入量が減少することによって資源減少に至ったのではないかという仮説も提示されている。

先にも引用したが片山・神薗(2000)は、周防灘のアサリ漁獲量減少は、基礎生産力の低下以外の要因を考慮する必要があるとし、過剰漁獲が原因ではないかとしている。一方、松川ら(2008)の総説でもアサリの資源激減の要因としては第一に過剰漁獲が挙げられるとしている。埋め立てにより東京湾のアサリの漁獲量が激減する1970年頃からアサリの単価が上昇しており、このことが過剰漁獲を誘引したとの指摘は正しい

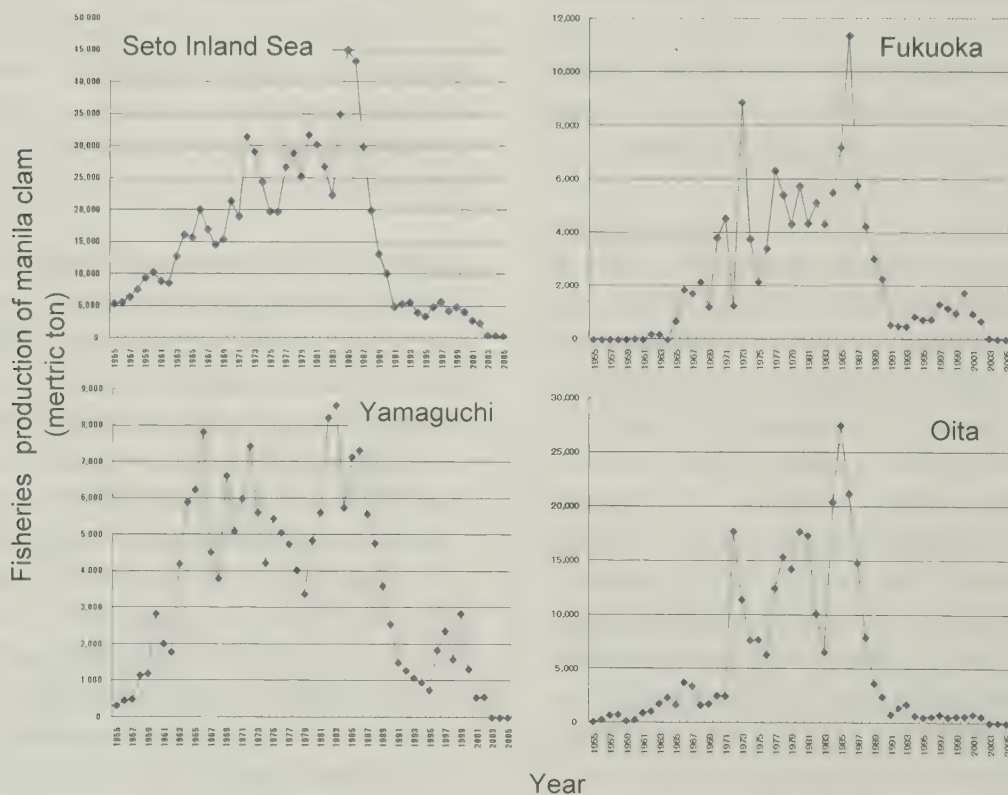


Fig. 5. Fisheries production of Manila clam in the Seto Inland Sea, Yamaguchi prefecture, Fukuoka Prefecture, and Oita prefecture from 1955 to 2006.

と考える。さらに、この時代以降、国民生活に余裕ができ、潮干狩りなども盛んになり、現在の横浜市海の公園での事例をみると潮干狩りによる過剰漁獲も深刻であると考えられるので、アサリの資源に対する漁獲圧は更に強くなっているかもしれない。しかしながら、アサリの生産には海洋環境が大きく影響しており、栄養塩の減少に伴う餌生物の減少に加え、アサリは変温動物であるので例えば、水温の上昇によって代謝活性が増大した場合、餌要求量が変化することが考えられるので、アサリ漁獲量減少要因の解明には、過剰漁獲だけでなく、幅広く環境の変化等についても検討する必要があると考える。

2. 周防灘の海洋環境の変化とアサリ漁獲量の関係解析

先に紹介した片山・神菌(2000)、和西ら(2006)の他、周防灘の海洋環境とアサリの漁獲量の関係を解析した論文は数多く出されている。しかし、単純にアサリの漁獲量と環境項目の相関を調べた例が多く、アサリの生理及び生態的情報を加味した上での解析はほとんどない。例えば、周防灘のアサリは3～11月までは成長するが、それ以外は成長しない。加えて、この時期は、殻長15mm以上のアサリでは成長とともに成熟という要素が加わるので餌の要求量が増加する。年によって変動はあるものの2006～2008年にかけて中津干潟のアサリは5～6月、7～8月、10～11月に成熟しており(上村ら, 2008)、アサリの配偶子形成には餌の量が関係してくることから(鳥羽, 1989; Yan *et al.*, 2006)、これらの時期の前には餌の要求量が多いと推測される。

また、中津干潟では7～9月には成長停滞やへい死が起り、障害輪はこのときに形成される。一方、近年の中津干潟における個体群動態の調査結果から、同干潟におけるアサリの加入量は殻長数mm以前で決定されているのではないかと考えられ、例えば、秋の着底稚貝の場合、翌年の4～5月までの間の減耗の多寡が大きく影響するので、この間の環境を評価する必要がある。一方、漁獲サイズに達するには現時点では約2～3年かかり、ある年に加入に成功したアサリはその後3～5年で漁獲される。これらについては、あくまでも現時点での調査結果からの推測ではあるが、現在残されている1980年代のアサリが沢山取れていた時期の貝殻を調べてみると障害輪の間隔から概ね漁獲年齢は変わらないと考えられる。

このように、アサリの餌要求量は成長段階や季節によって変化する(木下, 1985; 鳥羽, 1989; 磯野ら, 1998; 磯野, 1998; 磯野・中村, 2000; Nakamura,

2004)。また、生殖腺の発達状況からみた産卵期は年に2～3回あるが、そのうち周防灘の主なアサリ漁場である中津干潟の資源形成に重要な産卵期は秋であり、冬季の水温等の動向は、比較的環境ストレスを受けやすい着底初期のアサリに影響を与える。したがって、これらの要素を加味した上で海洋環境についても時期を区切って解析する必要がある。そこで、瀬戸内海区ブロック浅海定線調査観測30年成果集(瀬戸内海区水産研究所, 2006)で公表されているデータを中心に、必要な場合はその後各県の浅海定線調査報告を加え、30年間にわたり蓄積されたデータを季節毎に整理し、同海域のアサリの漁獲量との関係を網羅的かつ詳細に調べた。なお、漁獲量は資源量とは異なり、単価の高低等により漁獲圧が変動するなどの人的要因による変動幅が大きいことから、通常、海洋環境との関係解析には不適である。しかし、周防灘ではアサリの資源量のデータが乏しいので今回は漁獲量を用いて解析を行った。

解析は周防灘の海域を図1に示すⅢ、Ⅳ、Ⅴの3つの海域に分け、それぞれ該当する漁場もしくは県の漁獲量と、周防灘でのアサリの成長量を加味し、使用した漁獲量の前の3～5年間の浅海定線調査データ群を季節毎に分け、それぞれの移動平均を用いて回帰分析を行った。以下、それぞれの項目について説明する。

①水温・塩分

図1に示した周防灘の海域区分のうち第Ⅳ海域の冬季水温と同海域内で最大の漁場である中津干潟を含む大分県のアサリ漁獲量の関係を示す(図6)。すべての海域で冬季水温と各県のアサリの漁獲量はいずれも強い負の相関(第Ⅲ対山口県 $P<0.01$, $R=0.861$, $r^2=0.740$; Ⅳ対福岡県 $P<0.01$, $R=0.898$, $r^2=0.807$; Ⅳ対大分県 $P<0.01$, $R=0.886$, $r^2=0.786$)を示し、冬季の水温が高いとアサリの漁獲量が減少することから、冬季の水温の上昇が周防灘アサリ資源の減少に関与している可能性がある。周防灘のアサリ漁獲量が減少する時期は1980年代半ばであるが、この時期を契機として周防灘の冬季水温が有意に上昇している(樽谷, 2007)。冬季水温の上昇については、和西ら(2006)は周防灘の水温と気温の関係を調べ、有意な正の相関があることを示していることから、気温の上昇が原因のひとつと考えられる。近年の冬季気温の上昇は気象庁の観測データなどからも認められており、地球温暖化等世界規模での気候変動と併せて論じられることが多いが、それと超長期的に見た場合の通常の地球環境の変動幅の範囲内なのかについては明確な結論は得られていない。しかし、周防灘

においてはアサリの漁獲量の減少時期と冬季水温の上昇時期が一致しており、今後は冬季水温の上昇がアサリに及ぼす生理的、生態的要因について調べる必要がある

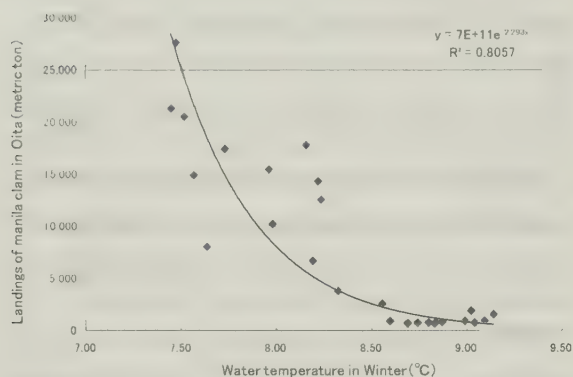


Fig.6. Relationship between the fisheries production of Manila clam and water temperature during winter in the Suo-Nada from 1970 to 2006.

これらのうち、生理的要因としては廣野ら（2008）は潜砂行動について着目し、肥満度や水温との関係を調べた自らの論文（廣野ら，2005）を引用し、冬季水温が低いほどその後のアサリの成長や生残が良いとしている。このように、元来冬季はアサリの餌が少なく成長が停滞するが、その際に水温が上昇するとアサリの体内で恒常性維持のためにエネルギーが必要となる。そのために体内におけるエネルギー収支が影響を受け、後の成長・生残に影響するという代謝仮説が挙げられる。

一方、生態学的要因としては捕食者の活動が水温上昇とともに活発になることが予想される。例えば、秋に加入したアサリ稚貝はこの時期0.5～1mm程度であるが、これを捕食するヤドカリ類等小型甲殻類の活動は水温の影響を受け、水温が高いと活発になると推測される。このような要因も調べ、アサリと冬季水温の関係について今後も詳細に検討する必要がある。

しかし、樽谷（2007）の論文中的数据の見方を変えると、アサリの漁獲量が多かった時代にのみ夏季及び冬季の水温が低い傾向を示しているように見える。玉置（2006）はアサリ資源はなんらかの要因により1970～1980年代に増加したのではないかとしており、その原因としてプランクトンの沈殿量の変化から、水中の植物プランクトンがこの時期増加し、それらを餌とする浮遊幼生期の生残率が良かったからではないかとしている。同時期は海域の富栄養化が進行しており、それによる植物プランクトンの一時的な増加を推測し

ている。これに加え、今回分析した冬季水温の低さもアサリの漁獲量を増加させる要因として挙げられるかもしれない。先にも述べたが周防灘のハマグリはアサリの資源量増加に先立ち減少しているが、ハマグリは温暖な環境を好む傾向がある。冬季水温の長期的変遷とアサリやハマグリの遷移に関連する詳細な検討も必要である。

一方、周防灘の冬季水温の上昇は貝類の生産に様々な影響を与えている（薄，2006）。その他、豊後水道からの外海水の影響の強い場所では、アサリ漁場に外海性で高水温・高塩分環境を好む同属別種ヒメアサリが侵入する事例（手塚ら，2005）が見られている。水温16℃以上を好むナルトビエイの周防灘への大規模かつ長期にわたる来遊を可能としているのも水温上昇が発端となっている可能性がある（山口，2003；2005；2006）。ナルトビエイによる食害は、これまでにアサリで知られている他の食害生物よりはるかに大きく、バカガイの事例では約数千トンが2カ月程度で食べつくされている（伊藤，平川，2007；伊藤ら，2008）。吉田（2007）および伊藤，平川（2009）は周防灘におけるナルトビエイの出現状況と食性を調べており、ナルトビエイはアサリ、バカガイだけでなく、マテガイや岩礁域の貝類も捕食していると報告しており、周防灘の貝類の生態系に大きな影響を与えていると推測される。先に述べたように、瀬戸内海の西部海域ほどナルトビエイの食害が大きいのは、水温上昇との関連が強いからではないかと考えられる。

このように冬季水温と周防灘のアサリの漁獲量には高い相関が見られたが、同海域の水温は気温との相関が極めて高いので、気温のデータも活用可能である。漁獲量のデータは浅海定線調査より古いものがあるので、気温と漁獲量を用いると過去50年の関係解析が可能となる。

②溶存酸素量

溶存酸素量とアサリの漁獲量の関係は海域によって異なる挙動を示した。第Ⅲ海域では春～夏にかけて溶存酸素量が低いほど漁獲量が多く、第Ⅳ海域では夏季の溶存酸素量が高いほど漁獲量が多かった。なお、周防灘の浅海定線で得られたデータでは、いずれもアサリの生存に影響を及ぼす溶存酸素量ではなかったので、溶存酸素量の低下による貧酸素水塊の発生によるアサリのへい死は少ない。一方、溶存酸素量は海域の有機物負荷と関連すると考えられ、有機物負荷が多いとアサリの餌となる植物プランクトンが増加する。第Ⅲ海域では溶存酸素量が低いほど漁獲量が多かったが、これは有機物負荷により餌が多かったためと考え

られる。一方、第Ⅳ海域では馬込ら（2005）の報告にあるように、夏季に山国川の出水後2週間後にアサリが生息する浅場で局所的に大規模な貧酸素水塊が発生することが知られているが、浅場の貧酸素水塊は中津干潟周辺のアサリのへい死原因となっている可能性がある。

③ SS・透明度

SSについては、第Ⅴ海域で夏場にのみアサリの漁獲量との相関が見られ、SSが多いほど漁獲量が多い。一方、透明度は第Ⅳ海域でのみ冬場の透明度が低いほどアサリの漁獲量が多かったが有意な相関は認められなかった。

④ 窒素・リン

いずれも瀬戸内海特別措置法施行以降、一時期急激に減少したが、その後の変化は緩やかである。窒素については溶存無機態窒素（DIN）をみると1980年代に比較的高い時期があり、これはこの時期の水温がやや低めに推移していることから、栄養塩の豊富な外海水の流入量が多かった可能性がある。しかし、灘全体では1970年から30年間で30～40%程度減少している。アサリ漁獲量との関係は海域および季節によって異なる。海域別に見ると中津干潟がある海域Ⅳでは夏場に底層のDINとアサリ漁獲量と有意な（図7； $P<0.01$ $r=0.825-0.829$ ）正の相関を示した。また、この解析によって得られた関係式（DIN濃度 = $0.4634\text{Ln}(\text{漁獲量}) - 1.0906$ ）を用いて大分県の漁獲量が10,000トンを超えるための第Ⅳ海域の夏季のDIN濃度を求めると $3.18\mu\text{M/L}$ 以上という結果が得

られる。夏場のアサリの栄養状態は同海域における主要な産卵時期である秋の配偶子形成や成熟に関連するので重要であると考えられる。一方、リンについてはリン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）の挙動をみると第Ⅲ、第Ⅴ海域では減少し、灘全体では1970年から30年間で30%程度減少しているが、近年変化が小さい。アサリ漁獲量との関係はDINと同様海域および季節によって異なる。海域別に見ると中津干潟がある海域Ⅳでは同海域における主要な産卵期（秋）の前の夏季にアサリ漁獲量と有意な正の相関（図8； $P<0.01$ $r=0.775-0.778$ ）を示す。これによって求められた関係式（ $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度 = $0.0428\text{Ln}(\text{漁獲量}) - 0.1484$ ）を用いて大分県の漁獲量が10,000トンを超えるための第Ⅳ海域の夏季の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を求めると $0.246\mu\text{M/L}$ 以上という結果が得られる。DINおよび $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は夏季に濃度が高かった時期にアサリの漁獲量が多いという傾向を示した。

周防灘は春季から夏季にかけて密度躍層が顕著であり、水塊は上層と下層の2つに分かれ上下間の海水混合は制限されており（武岡，1985），この時期や貧酸素水塊発生時に底質から栄養塩が溶出してくる（山本ら，1998；Tada and Montani, 2002）。したがって、夏季の底層のDINおよび $\text{PO}_4\text{-P}$ とアサリの漁獲量の高い相関についてはこれが直接この時期のアサリの餌生産に繋がるのか、あるいは、秋以降の循環期に表層に供給される栄養塩ストックとしての機能によるのかについては検討する必要がある。しかし、アサリの生息する場所は5mより浅く、各種かく乱により、上下2層の混合が見られるとともに、底層まで光が到達するので、アサリの生息場所でも十分一次生産が行

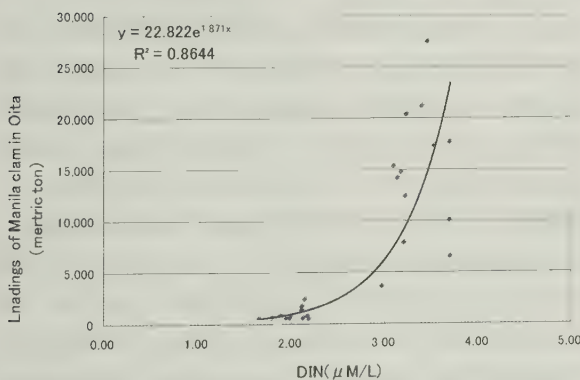


Fig. 7. Relationship between the fisheries production of Manila clam and dissolved inorganic nitrogen at bottom during summer season in the Suo-Nada from 1975-2006.

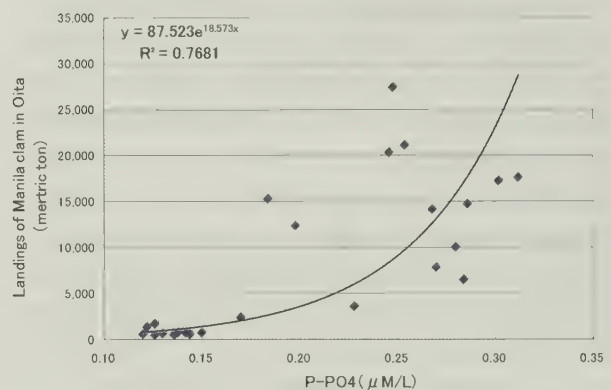


Fig. 8. Relationship between the fisheries production of Manila clam and $\text{PO}_4\text{-P}$ at bottom during summer season in the Suo-Nada from 1975-2006.

われており、底層付近に栄養塩があれば浮遊・付着珪藻類共に増殖が活発に起こり、アサリの餌供給に繋がっていると考えられる。また、飼育環境化では、アサリは温度が一定以上であれば1~2カ月で成熟するので、主要な産卵期である秋季の前のこの時期の餌環境がのちの成熟・産卵に関連する可能性は高い。これらのことが、夏季の底層の栄養塩とアサリの漁獲量が高い相関を示す原因と考えられる。

一方、浅海定線のデータを離れ別の観点から中津干潟周辺の栄養塩環境について考察する。それには現在、当研究室、及び環境動態研究室と広島大学が共同で実施している周防灘の流入陸水量の40%を占める山国川からの流下栄養塩類等の調査結果を使用する（稲村2006、齊藤2007）。この調査では、山国川下流域において月2回の頻度で河川水のサンプリングを行い、栄養塩、粒状有機炭素・窒素、生物起源粒状珪素、クロロフィルaの分析を行っている。これら各分析項目の濃度と流量のデータをもとに干潟域への物質負荷量を求めるとともに、窒素負荷量からアサリの年間最大生産量の推定を試みた。まず、亜硝酸および硝酸塩濃度に流量を乗じて、河川経由の窒素負荷量を求め、Redfield比を用いて一次生産量を推定した。さらに、幾つかの仮定をもとに、一次生産量から中津干潟におけるアサリの年間最大生産量の推定を試みた。その結果、山国川からの流入負荷によるアサリの潜在的年間生産量は1,285~5,774トンとなった。この値はこの調査を行った2006年の大分県の漁獲高255トンをはるかに上回っているが、1985~6年代の2~3万トンよりは低い。しかし、河川中の有機懸濁物や、干潟底泥からの栄養塩の溶出を考慮すると、中津干潟の潜在的生産力はアサリの漁獲量が多かった時期よりは低いかもしれないが、栄養塩の観点から見ると干潟周辺海域における生産力は現在でもかなり高いと推定される。このことから、同海域におけるアサリ資源の回復にとって、第一義的には片山・神菌（2000）や松川ら（2008）が指摘しているように、適正漁獲管理手法が重要と考えられる。

⑤ COD・クロロフィル量

CODおよびクロロフィルa量は1980年代には相対的に高い時期があったが、いずれもアサリ漁獲量との有意な相関は認められなかった。このうち、CODについては瀬戸内海特別措置法による総量規制により周防灘全体で30年前の30~40%が減少している（和西ら、2006）。クロロフィルaについては、現在の周防灘のアサリの安定同位体比の分析結果から水中の浮遊性植物プランクトンを餌として利用していることが伺

われているので、アサリ漁獲量と高い相関を示すのではないかと考えられたが、有意な相関は認められなかった。これについては、アサリが大量に漁獲されていた時期と現在ではクロロフィルa量としては変化は見られないものの、近年、植物プランクトンの種が変わっており、アサリの餌として有効な種が減少している可能性がある（板倉、2001；山本、2002；板倉・山口、2007）。

⑥ 海水位の変動

浅海定線調査の項目には無いが、近年、周防灘の海水位の変動とアサリの漁獲量の関係を論じた報告がある（天野、2004）。それによると、周防灘の海水位は約20年程度の周期によって変動しているが、海水位とアサリの漁獲量には強い相関が見られ、平均潮位より低い時期にアサリ漁獲量が多いという傾向を示している。地球温暖化の資料をみると、温暖化の進行に伴って世界的な規模で海水位の上昇が予想されている。周防灘のアサリについては、上記の報告から今後海水位が高くなると漁獲量が減少する要因となるのではないかと考えられる。

⑦ ケイ素の挙動

周防灘に流入する河川流量の約40%を占めるといわれている山国川の水質分析結果から、ケイ素については十分な供給量があると判断できる（稲村、2006；齊藤、2007）。また、海域での調査結果から、周防灘ではケイ素が制限要因となっていない（中嶋・井関、2006；中嶋ら、2006）。そのため、一部の海域で論じられているケイ素と他の栄養塩とのバランス（DSi:DIN比）の変化（見玉ら、2006）は顕著ではない。

⑧ 周防灘の海洋環境とアサリの漁獲量まとめ

これまでの解析結果から推測される周防灘の主要なアサリ漁場である中津干潟でアサリを10,000トン以上漁獲するための好ましい環境条件としては、冬季水温が8.5℃以下、ある一定以上の夏季の栄養塩（DINが3.2μM/L以上、アンモニア態窒素が0.24μM/L以上）が必要と考えられる。しかしながら、水温の変動については地球規模の環境変動によるものであれば、京都議定書の履行といったような国政や世界規模での行動が必要である。一方、海域の栄養塩類については中央環境審議会等による第七次答申に反映し、瀬戸内海の漁業生産についてどのレベルが良いのかについて更なる検討を進める必要がある。

3. 周防灘のアサリ漁業は復活できるのか？

これまで述べてきたように周防灘のアサリ漁獲量の減少原因には、冬季水温の上昇や季節的な栄養塩類の不足、海水位の上昇等の環境変動が疑われる。一方で、過剰漁獲による減少なども考えられる。仮に減少原因が環境変動によるものであるとすると対策方法は無いと考えられるが、果たしてそうであろうか。冬季水位の上昇や栄養塩類の減少といっても、アサリの生息限界を超えるものではない。したがって、これらの要因はアサリの内的な成長・成熟の遅延や再生産のサイクルの伸長などへの影響にとどまる。現に、有明海では周防灘と同じような状況でありながら、熊本県や福岡県内では覆砂事業による底質改善等によりアサリの資源量は回復しつつある（篠原ら，2009）。ここでは、漁獲管理をより厳密に行うことや食害対策を講じることなどにより、現在の環境下においてもアサリの漁獲量を増加させる、あるいは一定水準で維持することを可能としている。熊本県ではアサリ管理マニュアルを策定（熊本県，2006a；2006b；2007）するとともに、漁業者との対話を通じてこれらの実践を勧めている。以下に、その事例も参考に、周防灘のアサリ資源の回復のために取り組むべき内容を説明する。

①資源および漁業管理の徹底：ここで重要なのは、まず、過剰漁獲の防止の徹底である。資源保護のために殻長制限を設けても、それを行使する漁業者が所属する漁業協同組合が共販体制等の検査機能を持たない場合、ほぼ無効といってよいと考えられるので、まずは共販体制等の確立を図る。これによって取り過ぎを防ぎ、適正な漁獲量を維持する。次いで、漁業権が設定されている干潟等での漁業以外の採集を禁じ、漁協単位での局所個体群の保護や涵養を図る。

②資源の積極的な復活策：山口県のように資源量が極端に減少した地域では、親貝を積極的に増やす必要がある。それには、その地域にあった遺伝的特性を持った親貝を使った人工種苗の活用が望ましい。これには Yasuda *et al.* (2007) によって開発されたマイクロサテライトマーカーが有効である。さらに、湾・灘単位での海域の流れや浮遊幼生の分布特性や流れ、そして漁場の位置等を考慮して、母貝集団の適正な配置を考え、そこに人工種苗を放流し、保護することによって局所個体群を回復させる。次いで、そこを拠点として、次の局所個体群を形成し、メタ個体群の復活を図るべきである（浜口，2006）。現在、山口県、福岡県、大分県、瀬戸内海区水産研究所、広島大学および愛媛大学は共同で周防灘海域をモデルとして、様々な事業やプロジェクトを推進し、このような考え方に基づく調

査・研究を実施している。また、これまでは生産コストが高かったアサリ人工種苗のより安価な生産体系については、瀬戸内海区水産研究所百鳥実験施設が中心となって検討している。

③海岸開発や河川の影響評価と改善策：これまで海岸開発を行う事前のアセスメントでは、浮遊幼生等への影響が検討されてこなかった。しかし、近年、干潟域の開発にあたっては、浮遊幼生の移動分散調査やマイクロサテライト解析による個体群間の連結性の評価などメタ個体群（幼生ネットワーク）を配慮したアセスメントの必要性が指摘されている（浜口ら，2005；浜口ら，2006a）。一方、沿岸域に対する河川の影響は様々な学会で指摘されており（例えば、宇野木，2002，山本，2007），このような動きを通じ、改善策を提唱してゆくべきであろう。

④魚類による食害対策等：現在、瀬戸内海域ではクロダイ（重田，2008）やナルトビエイによる食害が顕著であり、それらの対策のためにはネット被覆（伊藤・小川，1999）、カゴ養殖（平川・中川，2005）や駆除（福田・銭谷，2010）など様々な試みが行われている。アサリ資源回復を目指して天然・人工種苗の放流を行う際などには、このような方法により徹底した保護を行う必要がある。さらに、近年開発された電磁パルスを用いた対策技術開発等新しい試みもある（中野，2004；浜口，2006b）。いずれにしても、食害対策は減少したアサリ資源を増やすためにはより強化が必要である。

おわりに

アサリの減少原因のひとつを海洋環境の変化であるとした場合、例えば、それが地球温暖化のような大きなスケールの対策が必要であると考えられるが、そのような状況でも前述したようにアサリ資源の回復は可能である。現在、大分県中津干潟では、JF おおいた中津支店や漁業者の皆さんが懸命に努力し、厳しい漁業管理を実践してアサリ資源の復活を目指して様々な活動を行っている。我々研究者としてもこのような試みに対し、全面的に協力するとともに、周防灘を起点にして全国のアサリ資源を復活させるための有効な方策を打ち出すことができればと考えている。

参考文献

天野玉雄，2004. 周防灘のアサリ漁獲量減少の要因について，平成16年度日本水産学会中国・四国，近畿両支部合同大会講演要旨集，p12.

- Balotro, R.S., A. Isobe, M. Shimizu, A. Kaneda, T. Takeuchi and H. Takeoka, 2002. Circulation and Material Transport in Suo-Nada During Spring and Summer Season. *J. Oceanogr.*, **58**, 759-774.
- Balotro, R.S., A. Isobe and M. Shimizu (2003): Seasonal variability in the circulation pattern and the residence time of Suo-Nada. *J. Oceanogr.*, **59**, 259-277.
- 藤原建紀, 宇野奈津子, 多田光男, 中辻啓二, 笠井亮秀, 坂本 亘, 1997. 外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量. 海岸工学論文集, **44**, 1061-1065.
- 藤原建紀, 小林志保, 高志利宣, 2003. 瀬戸内海の窒素・リンの輸送と起源の現地観測. 海洋工学論文集, **50**, 1-5.
- 福田祐一, 銭谷 弘, 2010. 周防灘の中津地先におけるナルトビエイの DeLury 法による来遊尾数と漁具能率の推定. 日本水産学会誌, **76**, 10-19.
- 浜口昌巳, 2005. 新たな調査手法によるメタ個体群動態解明. 月刊海洋, **37**, 125-132.
- 浜口昌巳, 2006a. 電磁パルスによるナルトビエイ対策技術開発. 瀬戸内通信, **4**, 4-5.
- 浜口昌巳, 2006b. 二枚貝の生産の場としての浅場の機能と保全, 再生戦略. 瀬戸内海, **47**, 17-20.
- 浜口昌巳, 手塚尚明, 山崎 誠, 井関和夫, 2008. 包括的環境保全と貝類漁業のあり方について—山・河川とアサリの関係—. 水産海洋研究, **72**(4), 311-317.
- 浜口昌巳, 堀 正和, 山田勝雅, 上村了美, 2009. 周防灘におけるアサリ・ハマグリ資源と海洋環境の関係. 水産海洋研究, **73**, 325-328.
- 橋本俊也, 山本民次, 多田邦尚, 松田 治, 永末寿宏, 1997. 瀬戸内海の一次生産と海洋構造. 沿岸海洋研究, **35**, 109-114.
- 早野智子, 井関和夫, 中嶋さやか, 手塚尚明, 浜口昌巳, 新村陽子, 2007. 周防灘西部海域における基礎生産量の季節変動と海洋環境との関連. 第6回海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム発表論文集, 129-134.
- 林 美鶴, 柳 哲雄, 2002. 周防灘と大阪湾の低次生産構造の比較. 海の研究, **11**, 591-611.
- 平川千修, 中川彩子, 2004. アサリ資源回復計画推進事業 (2) 大型種苗量産放流 B. 中間育成・放流技術開発研究. 平成16年度大分県海洋水産研究センター事業報告, 251-255.
- 平田貴文, 平手智晴, 杉原滋彦, 1987. 周防灘における透明度の変動特性. 水産大学校研究報告, **46**, 1-11.
- 廣野英生, 杉山清泉, 西沢 正, 鈴木輝明, 2005. 冬季波浪時におけるアサリの潜砂行動とエネルギー消費過程に関する実験的研究. 水産工学, **42**, 1-7.
- 廣野英生, 杉山清泉, 西沢 正, 鈴木輝明, 2008. 潜砂行動とエネルギー消費過程からみたアサリ資源回復に向けての諸課題. 水産工学, **44**, 169-174.
- 稲村寿里, 2006. 山国川から流入する栄養塩, 粒状懸濁物の季節変動と干潟生産への影響把握. 広島大学生物生産学部卒業論文.
- 石田基雄, 小笠原桃子, 村上知里, 桃井幹夫, 市川哲也, 鈴木輝明, 2005. アサリ浮遊幼生の成長に伴う塩分選択行動特性の変化と鉛直移動様式再現モデル. 水産海洋研究, **69**, 73-82.
- Ishii, R., Tarutani, K., and Hamaguchi, M., 2004. The long-term change in occurrence of the pacific oyster *Crassostrea gigas* larvae in Hiroshima Bay, Japan. *Proceedings of the Long-term variations in the coastal environments and ecosystems*, 312-316.
- 磯辺篤彦, 神菌真人, 俵 悟, 1993. 周防灘南西部における貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, **31**, 109-119.
- 磯野良介, 喜田 潤, 岸田智穂, 1998. アサリの成長と酸素消費量に及ぼす高温の影響. 日本水産学会誌, **64**, 373-376.
- 磯野良介, 1998. 東京湾盤洲干潟のアサリによる窒素摂取量の推定とその季節変動に関わる要因. 水環境学会誌, **21**, 751-756.
- 磯野良介, 中村義治, 2000. 二枚貝による海水ろ過量の推定とそれにおよぼす温度影響の種間比較. 水環境学会誌, **23**, 683-689.
- 板倉 茂, 2001. 内湾における水質環境の変化と植物プランクトン生態系. 月刊海洋, **33**, 393-398.
- 板倉 茂, 山口峰生, 2007. 瀬戸内海の赤潮発生機構と環境変動. 日本ベントス学会誌, **62**, 57-61.
- 伊藤龍星, 小川 浩, 1999. ネット被覆によるアサリ人工種苗の育成試験. 大分県海洋水産研究センター調査研究報告, **2**, 23-30.
- 伊藤龍星, 平川千修, 2007. 豊前海重要貝類漁場開発調査 (7) バカガイ稚貝調査. 平成17年度大分県水産試験場事業報告, 216-218.
- 伊藤龍星, 林 亨次, 平川千修, 2008. 豊前海重要貝類漁場開発調査 (5) バカガイの大量発生とナルトビエイによる食害被害. 平成18年度大分県農林

- 水産研究センター水産試験場事業報告, 207-209.
- 伊藤龍星, 平川千修, 2009. 胃と腸の内容物からみた周防灘南部沿岸におけるナルトビエイの食性. 水産技術, 1, 39-44.
- 伊藤龍星, 福田祐一, 2010. 飼育下におけるナルトビエイの摂餌行動と摂餌痕形成. 水産技術, 2, 73-77.
- 岩野英樹, 田森裕茂, 岩男 昂, 2001. 周防灘南部における栄養塩類を指標とした海洋環境の経年変化. 2001年度水産工学会秋季シンポジウム講演要旨集, 1-2.
- 岩男 昂, 2001. 周防灘大分県沿岸域の水質変動. 大分県海洋水産研究センター 調査研究報告水研講報, 3, 19-25.
- 科学技術庁, 1985. 海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究, 第I期. 成果報告書. 365pp.
- 上村了美, 手塚尚明, 鳥羽光晴, 浜口昌巳, 2008. 中津干潟におけるアサリの生殖周期. 2008年日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会講演要旨.
- 兼田淳史, 乗松桂輔, 渡辺浩三, 小泉喜嗣, 武岡英隆, 2002. 黒潮の離接岸が豊後水道の水温に与える影響. 沿岸海洋研究, 39, 181-188.
- 神菌真人, 田森裕茂, 吉岡貞範, 1988a. 周防灘の平均的水塊構造. 南西海区ブロック海洋研究会報告, 5, 21-30.
- 神菌真人, 池内 仁, 寺田和夫, 1988b. 周防灘西部海域への流入河川からの栄養塩負荷量. 福岡県豊前海水試報, 1, 131-135.
- 神菌真人, 吉田幹英, 石田雅俊, 三井田恒博, 1991. 海流ビンによる周防灘表層水の流動調査. 沿岸海洋研究ノート, 29, 97-103.
- 神菌真人, 江藤拓也, 佐藤博之, 1996a. 周防灘南西部における貧酸素水塊形成と気象変動の関係. 沿岸海洋研究, 33, 179-190.
- 神菌真人, 江藤拓也, 佐藤博之, 1996b. 周防灘南西部の浅海域下層における酸素収支. 海の研究, 5, 87-95.
- 片山幸恵, 神菌真人, 2000. 豊前海における基礎生産力. 福岡県水産海洋技術センター研究報告, 10, 91-94.
- 木下秀明, 1985. アサリの卵, 浮遊幼生, 稚貝の高温耐性. 海洋生物環境研究所研究報告, No. 85204, 1-38.
- 児玉真史, 田中勝久, 澤田知希, 都築 基, 山本有司, 柳澤豊重, 2006. 矢作川下流におけるDSi/DIN比の変動要因. 水環境学会誌, 29, 93-99.
- 熊本県, 2006a. アサリ資源管理の取り組み方法—アサリを安定的に漁獲するために—. P8.
- 熊本県, 2006b. 熊本県アサリ資源管理マニュアル. P18.
- 熊本県, 2007. 熊本県アサリ資源管理マニュアル—II—アサリを安定的に漁獲するために—. P27.
- 馬込伸哉, 磯辺篤彦, 神菌真人, 2002. 周防灘における貧酸素水塊の流入河川水に対する応答. 沿岸海洋研究, 40, 59-70.
- 松田 治, 1996. 低次生産様式のまとめと提言. 岡市友利, 小森星児, 中西 弘, 編. “瀬戸内海の生物資源と環境” p. 57-66, 恒星社厚生閣, 東京.
- 松川康夫, 張 成年, 片山知史, 神尾光一郎, 2008. 我が国アサリ漁獲量激減の要因について. 日本水産学会誌, 74, 137-143.
- 宮下幸久, 井関和夫, 湯川翔太, 小池一彦, 手塚尚明, 浜口昌巳, 2008. 周防灘における光環境. クロロフィルaおよび濁度の季節・海域変動. 広島大学生物圏科学研究科紀要, 47, 41-51.
- 門谷 茂, 山口一岩, 堤 裕昭, 濱田健一郎, 上田直子, 2002. 瀬戸内海・周防灘における夏季のリンの分布と生物生産環境. 沿岸海洋研究, 39, 171-179.
- 中野秀樹, 2004. 電気ショックでサメ害を防ぐ. 遠洋水研ニュース, 115, 10-11.
- Nakamura, Y., 2004. Suspension feeding and growth of juvenile manila clam *Ruditapes philippinarum* reared in the laboratory. *Fish. Sci.*, 70, 215-222.
- 中嶋さやか, 井関和夫, 2006. 沿岸域における生物起源ケイ素の分析手法の検討と春季周防灘における分布. 広島大学大学院生物圏科学研究科紀要, 45, 21-29.
- 中嶋さやか, 井関和夫, 斉藤美薦, 手塚尚明, 浜口昌巳, 上村了美, 2007. 周防灘における栄養塩および粒状懸濁物の季節, 海域変動と生物生産との関連. 第6回海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム発表論文集, 123-128.
- 斉藤美薦, 2007. 山国川から周防灘へ流入する栄養塩および粒状懸濁物の負荷特性と生物生産への影響評価. 広島大学生物生産学部卒業論文.
- Sarker, M.J., T.Yamamoto, T.Hashimoto and T. Ohmura, 2005. Evaluation of benthonic nutrient fluxes and their importance in the pelagic nutrient cycles in Suo nada, Japan. *Fish. Sci.*, 71, 593-604.
- 瀬戸内海区水産研究所, 2006. 瀬戸内海区ブロック浅海定線調査観測30年成果集, 197pp

- 清木 徹, 駒井幸雄, 小山武信, 永淵 修, 日野康良, 村上和仁, 1998. 瀬戸内海における汚濁負荷量と水質の変遷. 水環境学会誌, **21**, 780-788.
- 重田利拓, 2008. 瀬戸内海の魚類に見られる異変と諸問題. 日本水産学会誌, **74**, 868-872.
- 篠原満寿美, 徳田眞孝, 杉野浩二郎, 2009. 福岡県有明海産のアサリの流通について. 福岡県水産海洋技術センター研究報告, **19**, 157-161.
- Tada, K and S. Montani, 1997. An evaluation of phosphate upward fluxes from the coastal sediments by three different methods. *Fish. Sci.*, **63**, 567-562.
- 高橋 暁, 清木祥平, 2004. 瀬戸内海の長期水温変動. 海と空, **80**, 69-74.
- Takashi, T., T. Fujiwara, T. Sumitomo, and W. Sakamoto, 2006. Prediction of slope water intrusion into the Kii Channel in summer. *J. Oceanogr.*, **62**, 105-113.
- 武岡英隆, 1985. 瀬戸内海の密度成層. 海と空, **60**, 145-152.
- 武岡英隆, 1989. 貧酸素水塊の物理モデル. 沿岸海洋研究ノート, **26**, 101-108.
- 武岡英隆, 1999. 外洋から瀬戸内海への栄養塩の流入とその最近の変化. 瀬戸内海, **19**, 4-7.
- 武岡英隆, 菊池隆展, 速水佑一, 榊原哲郎, 2002. 瀬戸内海における外洋起源の栄養物質. 月刊海洋, **34**, 406-411.
- 玉置昭夫, 2004. ベントスに関することとくにアサリ漁獲量激減に関連して. 水環境学会誌, **27**, 301-306.
- 田森裕茂, 吉岡貞範, 神蘭真人, 1986. 周防灘の海況と水質の経年変化. 南西海区ブロック海洋研究会報告, **3**, 13-20.
- 樽谷賢治, 2007. 瀬戸内海の環境の30年間の変化—水産の環境モニタリング“浅海定線観測調査”のとりまとめ—. 日本ベントス学会誌, **62**, 52-56.
- 寺田和夫, 神蘭真人, 1984. 周防灘西部, 豊前海. における基礎生産について. 福岡豊前水試研報, 昭和58年度, 189-200.
- 寺田和夫, 神蘭真人, 1985. 豊前海のプランクトン相について出現種とその分布. 福岡豊前水試研報, 昭和59年度, 172-210.
- 手塚尚明, 上村了美, 浜口昌巳, 樽谷賢治, 真鍋康司, 木下嗣生, 2005. 瀬戸内海周防灘沿岸のアサリ養殖場内におけるアサリとヒメアサリの分布. 日本プランクトン, 日本ベントス学会合同大会講演要旨集, p.81.
- 鳥羽光晴, 1989. アサリの水槽飼育での性成熟過程における摂餌量の重要性. 水産増殖, **37**, 63-69.
- 上 真一, 1996. 基礎生産から魚類生産への転換. pp. 57-66. 瀬戸内海の生物資源と環境, 岡市友利, 小森星児, 中西 弘, (編), 恒星社厚生閣, 東京.
- 薄 浩則, 2007. 温暖化が貝類の増養殖に与える影響. 瀬戸内通信, **6**, 8-9.
- 宇野木早苗, 2002. 河川事業が沿岸環境へ与える影響を物理面から考える. 海の研究, **11**, 637-650.
- 湯浅一郎, 橋本英資, 上嶋英機, 1993. 冬期の伊予灘における熱塩フロント付近のリン, 窒素分布. 海と空, **69**, 15-26.
- 和西昭仁, 2004. 山口県周防灘海域における水温と塩分の長期変動. 山口県水産研究センター研究報告, **2**, 1-6.
- 和西昭仁, 佐藤利幸, 平澤敬一, 2006. 7. 周防灘. 瀬戸内海区ブロック浅海定線調査観測30年成果集, 114-159.
- 山口敦子, 2003. 有明海のエイ類について—二枚貝の食害に関連して—. 月刊海洋, **35**, 241-245.
- 山口敦子, 2006. 日本沿岸域へのナルトビエイ *Aetobatus flagellum* の出現と漁業への影響. 月刊海洋, **45**, 75-79.
- 山口峰生, 安楽正照, 1984. 瀬戸内海西部周防灘における基礎生産について. 南西海区水産研究所研究報告, **17**, 135-149.
- Yamaguchi, H., S. Montani, H. Tsutsumi, K. Hamada, N. Ueda and K. Tada, 2007. Dynamic of microphytobenthic biomass in a coastal area of western Seto Inland Sea, Japan. *Est. Coastal and Shelf Sci.*, **75**, 423-432.
- 山本民次, 松田 治, 橋本俊也, 妹背秀和, 北村智顕, 1998. 瀬戸内海底泥からの溶存無機態窒素およびリン溶出量の見積もり. 海の研究, **7**, 151-15.
- 山本民次, 石田愛美, 清木 徹, 2002. 太田川河口水中のリンおよび窒素濃度の長期変動—植物プランクトン種の変化を引き起こす主要因として. 水産海洋研究, **66**, 102-109.
- Yamamoto, T., 2002. Proposal of mesotrophication through nutrient discharge control for sustainable fisheries. *Fisheries Science*, **68**, 538-541.
- 山本民次 2005. 瀬戸内海が経験した富栄養化と貧栄養化. 海洋と生物, **158**, 203-213.
- 山本民次 2007. ダム建設によるエスチュアリーへの貧栄養化と植物プランクトン相の変化. 日本水産学会誌, **73**, 80-84.

- 山本昌幸, 2003. 瀬戸内海中央部の備讃瀬戸における水温と塩分の長期変動. 水産海洋研究, **67**, 163-167.
- Yan, X., G. Zhang and F. Yang, 2006. Effects of diet, stocking, density and environmental factors on growth, survival, and metamorphosis of Manila clam *Ruditapes philippinarum* larvae. Aquaculture, **253**, 350-358.
- 柳 哲雄, 樋口明生, 1979. 瀬戸内海の恒流. 沿岸海洋研究ノート, **16**, 123-127.
- 柳 哲雄, 樋口明生, 1981. 瀬戸内海の潮汐・潮流. 第28回海岸工学講演会論文集, 555-558.
- Yanagi, T. and D. Ishii, 2004. Open ocean originated phosphorus and nitrogen in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr.*, **60**, 1001-1005.
- Yasuda, N., S. Nagai, A. Yamaguchi, C. L. Lian, M. Hamaguchi, 2007. Development of microsatellite markers for the Manila clam *Ruditapes philippinarum*. Molecular Ecology Notes, **7**(1), 43-45.
- 吉岡貞範, 神蘭真人, 田森裕茂, 1987. 周防灘の平均的な海況. 南西海区ブロック海洋研究会報告, **4**, 11-32.
- 吉田太輔, 2007. 瀬戸内海におけるナルトビエイ *Aetobatus flagellum* の出現状況と食性. 広島大学生物生産学部卒業論文. P.126.

各県のアサリ, ハマグリ, バカガイ等の資源量および生産量の変遷は平成8年度以降の大分県海洋水産研究センター浅海研究所事業報告にある豊前海重要貝類漁場開発調査並びに浅海干潟重要貝類調査, 福岡県豊前海研究所の豊前海貝類資源調査, 山口県内海水産試験場報告, 山口県水産研究センター事業報告を参考にしました。

瀬戸内海の流動と栄養塩に関するレビューと流動・低次生産モデルの開発

中山 哲巖*

Review of characteristics on the current and nutrients distribution of Seto Inland Sea, and development of the hydrodynamic model coupled with primary production model applied to this region

Akiyoshi Nakayama *

Abstract : Decrease in fishery resources in the semi-closed sea, such as Seto Inland Sea, Ariake Bay and so on, has been a serious problem. The project started in 2006 for finding how to improve or preserve their environment for restoring fishery resources in the inland sea and how to keep or improve physical and chemical conditions closely related to fishery resources and ecosystem. Reviews or analysis for investigating material circulation through food chain or ecosystem in the Seto Inland Sea were done in this project.

In this report, the current and nutrients transportation in the Seto Inland Sea as one of important elements that directly influence the biological production are discussed by reviewing the results of studies on the large semi-closed sea such as the Seto Inland Sea. The resolved problems and unresolved problems are made clear. The current and nutrients transportation in the Seto Inland Sea are also discussed from point of the process of biological production, environmental capacity, resource management and increasing fishery resources. According to the review, a hydrodynamic model coupled with primary production model was developed and applied to the Seto Inland Sea. The results calculated by this model show a good agreement on the hydraulic characteristics of the Seto Inland Sea. But primary production model included in this model should be improved by reevaluating its parameters and its structure.

Key words : Inland sea, current, nutrients transportation, hydraulic model, primary production model

瀬戸内海や有明海などは水産資源の減少が深刻となっている。我が国有数の内湾域を豊饒の海へ回帰させるために必要な環境とは何かを解明することを目指し、漁業や生物環境に関連した栄養塩をはじめとする物理・化学環境などの望ましい水準を明らかにするための研究方向を具体化する目的で、地域連携プロジェクト研究により、検討を平成18年に実施した。本プロジェクトでは、瀬戸内海を主な研究対象領域として、食物連鎖を通じた栄養段階間の物質循環の定量的関連

性を把握するための研究レビューやデータの解析など必要な作業を分担して行った。

本論文は、プロジェクトの課題の一つとして海域の生物生産に直接的に影響を与える流動と栄養塩を取り上げ、広域な閉鎖性水域に関するこれまでの研究成果をもとに、生物生産過程や環境容量の把握、資源管理・増殖といった観点から検討したものである。さらに、基本となる流動・低次生産モデルを構築し、瀬戸内海全域に適用した結果を紹介する。

2010年8月30日受理 (Received on August 30, 2010)

独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所水産土木工学部水産基盤グループ 〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7
(Leader of Fisheries Infrastructure Group, Aquaculture and Fishing Port Engineering Division, National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency, Hasaki 7620-7, Kamisu-shi, Kashima-gun, Ibaragi-ken, Japan, zip code 314-0408)

試料と方法

結果及び考察

瀬戸内海という広大な閉鎖性海域に着目し、以下の点に主眼を置いて検討した。

- (1) 瀬戸内海及び周辺外洋域を含めた流動に関する研究成果の収集と分析

同海域における流動特性に関する研究成果を収集し、同海域での流動を決定づける潮汐、気象、河川流入に伴う全体的な流動の特性（密度特性、潮流流・吹送流・河川流等の相互干渉、季節変動等）を把握する。

- (2) 瀬戸内海での長期的な栄養塩動態の実態把握及びデータの収集、河川・外洋からの栄養塩動態の把握

同海域における栄養塩動態を長期的な視点で把握するために、研究論文の収集、浅海定線調査・国交省による定点調査等多くのデータベースの収集、主要河川の流量・水質に関するデータベースの収集に努める。

- (3) 瀬戸内海の地形特性を適切に取り扱うことができ、流動や水質変動を比較的良く表現出来る数値モデルの検討

多くの海峡や干潟を含んだ同海域において、(1)、(2)で抽出した課題に答え得る複数の数値モデルに関する研究成果及びソフトウェアの機能を検討し、適切なモデルを選定し、瀬戸内海への適用のための改良処理を行い、瀬戸内海全域の流動・水質等の概略検討を行う。

流動（レビュー）

瀬戸内海の地形を Fig. 1に示す。この図から、西側に豊後水道、東側に紀伊水道があり、この間を結ぶ長大な水路とみることができる。この水路は単調ではなく、海峡・湾・灘によって構成されている。さらに陸域から数多くの河川が流れ込んでいる（1級河川21）。瀬戸内海の流れは、豊後・紀伊両水道における水位、流速、密度プロファイルと瀬戸内海に流れ込む淡水の流入、風・気圧分布によって支配されており、これらが相互に干渉して、流れが形成されると考えられる。

最初に既存の研究を検討し、瀬戸内海の流れを再現・評価するために必要な重要課題を以下に列挙する。

- (1) 豊後・紀伊両水道での水位、流れ、密度プロファイルの時空間推定（黒潮と豊後・紀伊両水道周辺水塊の応答）
- (2) (1)と連動した両水道周辺の陸棚斜面水（低温・高塩分）の挙動（黒潮と豊後・紀伊両水道周辺水塊の応答）
- (3) 河川流入量の的確な把握（内海の密度流に關係）
- (4) 適切な拡散係数のモデル化又は設定（内海での混合や密度フロント周辺の流れ・物質輸送の再

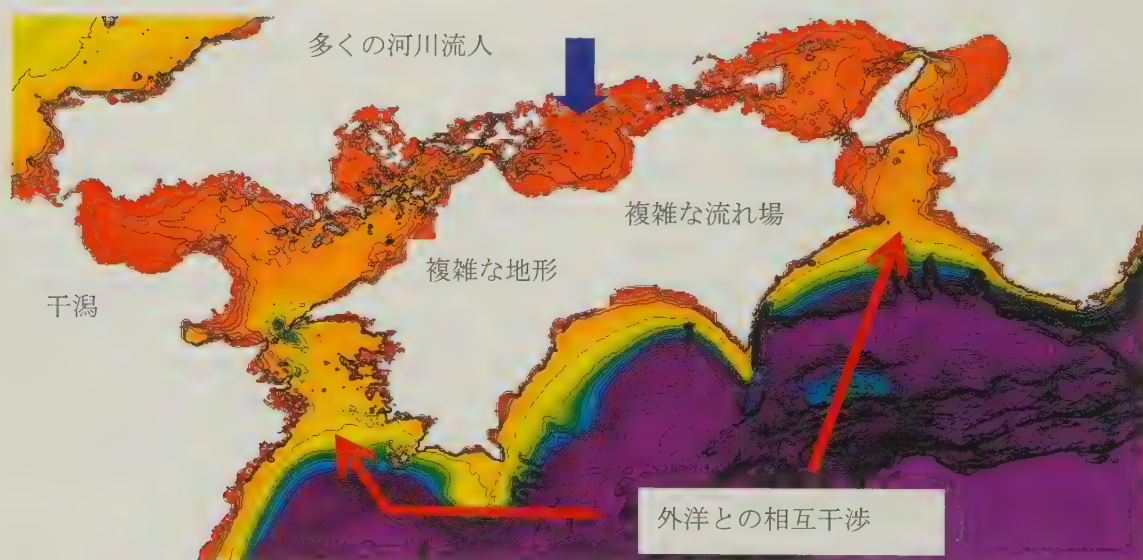


Fig. 1. Bathymetry of the Seto Inland Sea.

現、強流域・緩流域の流れや成層状況を評価する精度の良い計算が必要)

- (5) 瀬戸内海での風外力の適切な設定 (地形の影響を考慮した風速分布)

各海域における流動構造に関する研究密度はまちまちである。研究が数多く行われているのは、豊後水道、紀伊水道、大阪湾、広島湾であろう。個々の海域での研究が多く、対象とする時期等による相違もある。ここでは、瀬戸内海全体の傾向をつかみ、次にどのようにして、流れの場を時空間的にとらえるか、あるいはこの流れを数値計算などで再現するに当たって検討すべき課題を抽出することを主目的とした。従って、瀬戸内海全域を対象とした研究、外洋と内海との相互作用、海峡と湾での流れ構造、風による広域的な流れ等に関する研究に絞って取り上げた。なお、流動と水質は密接に関連しており、両者を区別することはできない。本論では、流動と水質をあえて分けているが、実際には同一の論文で検討されていることが多い。従って、重複する部分もあることを記しておく。

まず、瀬戸内海全域における流れの特性について述べる。瀬戸内海は先に述べたように外洋と接続する紀伊、豊後両水道に挟まれ、複数の湾・灘・海峡で構成されている。橋本ら (1997) は、瀬戸内海を鉛直混合強度の季節変動を指標として9海域に区分し、一次生産量の地理的・季節別変動を調べて、海洋構造との関係を考察した。船による観測データ (春, 夏, 秋, 冬) を基に成層・混合状態を検討し、瀬戸内海をⅠ周年成層域, Ⅱ成層卓越域, Ⅲ混合卓越域, Ⅳ周年混合域の4つの海域に区分した。その結果、大阪湾奥、広島湾奥部をⅠ、播磨灘をⅡ、周防灘、伊予灘、広島湾、燧灘、備後灘、明石海峡を含む大阪湾西部をⅢ、備讃瀬戸、安芸灘、伊予灘南部 (豊予海峡) をⅣとした。このように混合域、成層が卓越する海域が混在しているのが瀬戸内海であるといえよう。混合域か、成層域かは、流動の大きさ、密度成層の度合いで変化し、各海域に流れ込む河川流量とも関係している。

瀬戸内海を一つの水路とみると、全体的に東西どちらに流れているのであろうか? 藤原ら (2006) は、瀬戸内海を通過する流量の長期変動に関して、通過流は主に風、東西の水位差により生じるとして、経年変化を検討している。風による通過流は主に冬の季節風で起こされるために年平均すると東向きとなる。水位差による通過流は長期的かつ大きな変動をする。西向き傾向の時期は、黒潮が大蛇行した時期に一致するとしている。このような通過流の長期変動は瀬戸内海内部の塩分分布に大きな影響を与える。通過流量の変動は、外洋域における黒潮の変動が大きく影響している。

では、外洋と接続する紀伊、豊後水道の流れはどうであろうか? 紀伊水道、豊後水道に関する流動、水質に関する研究は、笠井ら (2001)、高志ら (2002)、藤原ら (2003)、武岡 (1996)、兼田ら (2002)、速水ら (2006) によって系統的に行われてきた。紀伊水道では、黒潮の離接岸によって大きく流況が変化する。黒潮離岸時に顕著に低水温水塊が底層から侵入し、その波及範囲は、紀淡海峡を経て明石海峡にまで及ぶことがある。豊後水道では急潮、「底入り潮」が直接的に宇和海を経て伊予灘南部海域に波及する。このような流れが瀬戸内海の栄養塩分布に大きく影響すると考えられる (後述)。豊後水道では九州東岸への黒潮接岸時にそれぞれ低温・高栄養塩水 (離棚斜面の冷水) の侵入が見られる。どちらもキーとなるのは陸棚斜面に存在する低温・高栄養塩水塊の挙動である。低水温水塊の侵入に対応して、周辺水位もおそらく低下すると考えられる。兼田 (2002)、藤原ら (2006) はこのことに着目し、周辺水温と水位に高い相関があることを指摘している。紀伊水道と豊後水道との違いは、紀伊水道に明確な急潮がないことである。武岡 (1996) は、このことについて豊後水道の小潮時には水塊間に大きな密度差があり、内海に波及しやすいのに対して、紀伊水道では豊後水道に見られるような大きな密度差が無いため、急潮となって内海へ波及しないとしている。

Kobayashi and Fujiwara (2006) は陸棚内と外洋との相互作用効果の把握及びモデル化を目的として、30年間の長期間にわたる数値計算による検討を行っている (対象領域; 備讃瀬戸より紀伊水道)。モデルは多層レベルモデルを用い、水平拡散係数、鉛直拡散係数、大気との熱交換、河川流量データ、風データを用いて計算を実施した。計算結果は概ね観測結果を再現しており、水温・塩分、流動構造は、日射、河川流量、風、海水交換に依存しているとしている。また、境界条件 (外洋境界水温・塩分、河川流量)、外力条件 (風速) に関して、年変動を考慮するか、しないかによって、どのような変動をもたらすかを検討するとともに、紀伊水道における水温と NO_3 に高い相関があることを用いて、外洋からの NO_3 供給を計算した。その結果、黒潮接岸時と離岸時では NO_3 の分布が大きく異なっており、計算値・観測値から、 NO_3 に関する外洋起源の割合を推定し、離岸時においては、 NO_3 は大阪湾西部及び播磨灘南部にまで達すること、接岸時では紀伊水道南部までしか波及しないことを明らかにした。さらに、季節的な流れ・密度・ NO_3 の分布構造を示し、外洋、陸棚との相互作用は陸棚、内海域に大きな影響を与えること、内湾の物理・生物特性は黒潮など外洋での長期的な流動の変化に影響を受けていることを示

した。一連の検討結果から、瀬戸内海の流動や栄養塩の適切な推定手法として、黒潮離岸距離と紀伊水道の水温の相関関係、紀伊水道における水温・ NO_3 の相関関係を利用することを提案している。

田中ら（2005）は、多層モデルを用いて、瀬戸内海全域において潮汐（M2潮成分）による流動を計算した。また、計算においては、風（西風3 m/s）を考慮した計算を行っている。計算では、単層、3層の計算を行い（ただし、密度一定）、双方とも観測結果との一致度は良かったが、位相誤差は3層レベルモデルの方が少なかったとしている。瀬戸内海での数地点での断面流量を計算した結果、多層レベルモデルの方が、流量が若干小さくなることが分かった。季節風の影響が単層モデルでは小さくできる可能性があり、多層レベルモデルでの検討が必要であるとしている。

浜走ら（2001）は国交省のデータ、各地の水位データ等を基本として、ボックスモデルを適用し、海域の水塊体積時間変化率は、海域への流入、流出及び海域への河川流入量で決まるとして、海域間の海水移流量を求めた。海域区分は伊予灘、広島湾・安芸灘、燧灘・備讃瀬戸、播磨灘・大阪湾・紀伊水道としている。移流量の月ごとの変化から、全体として7～10月に移流量が多くなり、2～6月には瀬戸内海西部、中央部では外から内へ向かう流れが生じ、8～1月には瀬戸内海全体で内から外へ向かう流れが生じている。年平均の移流からは瀬戸内海から外海への流れとなり、特に東部海域は年間を通して外海に向かう流れとなる。さらに瀬戸内海東部を分割し、播磨灘、大阪湾、紀伊水道間の移流量を推定した結果から、7月頃から大阪湾から紀伊水道への流れが生じ、同時に播磨灘から大阪湾に向かう流れが生じる。9月頃から播磨灘から紀伊水道に向かう流れが卓越すると播磨灘から大阪湾への流れは小さくなるとしている。塩分を保存量として海水交換量を求め、紀伊水道・外海間、豊後水道・伊予灘間、備讃瀬戸・播磨灘間では他海域の数倍となること、また、備讃瀬戸・播磨灘間では7～8月に他海域の10倍近くになることを示した。東部海域での海水交換量に関しては、夏期に海水交換量は卓越する。播磨灘・大阪湾の海水交換は両海域の塩分逆転に対応してピーク値を取っている。東部海域の海水交換量は西部海域の伊予灘・広島湾間と同程度であるなどとしている。

駒井ら（2001：2002）は、瀬戸内海における平年の密度、海面気圧と水位の季節変動量の関係について考察を行い、外海水位、密度、海面気圧による水位変動を推定した。外海水位を境界条件とした平面2次元数値解析モデルによって瀬戸内海の水位の季節変動量を推定した結果、外海水位と密度分布及び海面気圧

による影響により水位の季節変動量が概ね説明できるとしている。さらに駒井ら（2003）は、瀬戸内海総合水質調査データを用いて、最近の20年間を対象とし、季節的に変動する瀬戸内海での流れ場について検討した。前述した計算モデルを改良し、水位・水温（黒潮流路）、河川流出量の特徴から分けられた3つの期間（1982-88豊後水道水位高、89-93紀伊水道高、河川流量大、94-99紀伊水道水位大）に適用し、各期間の平均的な1年間の内海での流れ場（月毎）の比較を行っている。豊後水道から紀伊水道に向かう流れが卓越しているが、内海への河川流出量や密度分布によって流れ方向が変化することが明らかにされたとしている。

陸田ら（2003）は、複雑地形を有する瀬戸内圏を対象とした大気海洋モデルを開発し、16方位の風向によって形成される局地風の風況特性、吹送流の応答特性を検討した。瀬戸内海を対象とした大気海洋モデルは、局地気象モデル ARPS (The Advanced Regional Prediction System) と海洋モデル POM (Princeton Ocean Model, ただし密度一定) に基づきモデル構築がなされている。その結果、瀬戸内海では、海域周辺の3次元的な陸地形の効果によって吹送流の応答特性が大きく異なることが明らかとなった。つまり、瀬戸内海のように四方陸地に囲まれた閉鎖性海域の気象・海象特性を把握するには、3次元局地風や瀬戸内海特有の海岸・海底地形を無視することは出来ないとしている。地形的に東西方向に開けた瀬戸内海は、その方向の風によって大きな吹送流が発生しやすい。冬季の季節風により、東方向の流れが強化・卓越する傾向があるといえる。

阿保ら（2006）は、冬季の東部瀬戸内海における無機態窒素濃度に及ぼす残差流の影響を検討している。密度場及び風速場から、診断モデルにより東部瀬戸内海の残差流を計算した。残差流は風の影響を強く受け、季節風の強い1～2月には東向きの通過流が発生し、播磨灘北部では強い東向きの残差流が発生した。この残差流に伴い、栄養塩濃度の低い水塊が燧灘から東進し、備讃瀬戸及び播磨灘の栄養塩が低下した。播磨灘北部の栄養塩濃度は、夏期に低く、秋に上昇して12月に最大となり、冬季になると低下した。この冬季の濃度低下は東向きの残差流発生後に起こり、西よりの季節風が早期から強い年には栄養塩濃度の低下が早く、ノリ養殖不作の原因になることが指摘されている。

海峡部の流れについては、小林ら（2006）は、瀬戸内海中央部（備讃瀬戸と播磨灘）の潮汐フロント域において密度流の実測（流速・塩分プロファイル、鉛直拡散係数）を行い、数値モデルと併せてフロントを横切る流れが生じる機構について検討を行った。潮汐フ

ロント域では水平密度勾配による密度流が生じ、流れの主成分はコリオリの効果によってフロントに従う方向となる。しかし、それが陸岸に達した後は岸に沿って流れるため、フロントを横切る方向となり、これに対応した物質輸送が生じるとしている。これは陸岸に囲まれた潮汐フロント域に共通するメカニズムであると考えられる。

水質（レビュー）

瀬戸内海の水質に関する既存の研究を検討して得られた主な結論、課題等をまとめると以下の様になる。

- (1) 外洋からの栄養塩供給は無視出来ない。水温と栄養塩の相関は高い。黒潮の離・接岸が重要である。
- (2) 陸域からの栄養塩負荷は減少した。しかし、海域の栄養塩分布は必ずしもこれに対応していない。
- (3) 西部海域と東部海域では N/P 比が異なる。植物プランクトンにとっては、西部海域では窒素制限、東部海域ではリン制限の傾向があると考えられる。
- (4) 大阪湾は、陸水負荷の寄与率が高い。
- (5) 海峡部は強い流れのために栄養塩の水平輸送能力は高い。
- (6) 栄養塩輸送は、備讃瀬戸周辺を境界として、東西に分かれる傾向にある。
- (7) 河川水に含まれる栄養塩濃度、懸濁態等の適切な推定が必要である。

以下に、取り上げた既存の研究について述べる。

瀬戸内海に流入する 1 級河川は 20 程度と多い。これらの河川からの淡水流入による瀬戸内海への栄養塩供給は大きい。年間総流量の変動が大きい、長期なトレンドは見られない。李ら（1995）は、原単位法を用いて流入負荷量の瀬戸内海水域毎の COD、T-N、T-P の経年変化（昭和 62 年まで）を推定している。全体的な経年変化の傾向は、①昭和 40 年代の急激な増加傾向、②それ以降の減少、③昭和 50 年前半から昭和 60 年代はほぼ横ばいの傾向となっている。最近の傾向は不明であるが、浄化施設の充実及び排出規制による汚濁負荷の減少等を考慮すると減少傾向であると考えられる。各海域別に見ると、大阪湾への負荷流入が最も大きく、全体の 37.1% を占めている。続いて播磨灘、周防灘、紀伊水道、燧灘、安芸灘、伊予灘、備讃瀬戸の順である。そのほか、海域別に負荷量についての研究成果があるが、上記の経年変化の傾向は一致している。

では実際の海域別での栄養塩等水質の長期的変はど

うになっているのであろうか？海域での窒素、リンの経年変化については、せとうちネット（2009）によると経年的な変化は少ないが、TN、TP はともに近年では横ばい傾向で、COD、透明度は漸増傾向であった。平成 15 年度の海域別 COD は、大阪湾、備讃瀬戸、周防灘、播磨灘、燧灘、安芸灘、紀伊水道の順であった。前述した負荷流入量と海域での濃度の順位が異なっているが、これは主にその面積及び流動環境が海域によって異なっていることによるものと考えられるが、第 1 位は大阪湾で共通であり、負荷量も多くかつ富栄養化が進んでいる状態となっていることが分かる。

瀬戸内海全体での栄養塩輸送機構については、藤原ら（2003）が種々のデータベースや現地調査等から検討している（ただし夏の場合）。外海水が紀伊・豊後水道下層から瀬戸内海中央部に進み、備讃瀬戸で上昇して、東西に分離し、上層へ数 km/日の流速で広がる。海域毎にみると潮流の早い海峡部ごとに強混合域が存在する。紀伊水道側では底層の栄養塩が紀淡海峡で鉛直混合を受け、一部は有光層、残りは大阪湾西部底層を通過し明石海峡で有光層に供給される。豊後水道側では、豊予海峡において有光層に供給され、伊予灘 10m 層を通過し、来島海峡から再度底層を通過する。この輸送ルートでは、伊予灘の有光層内で消費され、来島海峡から燧灘下層への流入水は貧栄養となる。このために燧灘は全層で貧栄養となる。

柳を共通とする研究者らは、瀬戸内海での栄養塩動態（窒素・リンの現存比率、溶存態 N、P、Si の分布、全リン・全窒素の起源と濃度変動機構、沿岸域・全域における TP・TN 濃度変動機構）について、一連の検討を行っており、以下に述べる。

瀬戸内海で長年実施されている水質調査データ（全域に対する広域総合調査、環境省；沿岸に対する公共用水域水質調査、地方公共団体他）を基に、瀬戸内海各灘・湾における水質制御指標を提案し、水域毎の特性を検討した（石井・柳、2005）結果、富栄養化対策として実施される陸域からのリン・窒素負荷総量規制の効果の現れやすい水域と現れにくい水域が存在している。陸域負荷の影響を受けやすい陸域から概ね 2～3 km の領域を「沿岸域」とし、紀伊水道から豊後水道を含む（響灘を除く）水域全体を「全域」として検討している。解析対象は鉛直混合が活発な冬季のデータを用い、1979～1998 年の期間では、沿岸域では TP、TN とも減少していること、TP の減少が大きいこと、全域では TP に関しては減少傾向にならず、むしろ微増傾向であること、全域の TN も長期トレンドとしては微増傾向であることを明らかにした。陸域か

らの負荷が減少しているのに、全域の TP, TN が増加している理由として、外洋起源の栄養塩流入の増加、底質からのリン・窒素の溶出増加の可能性を挙げている。DO の経年変化は微増傾向であることから、底質からの溶出増の可能性は少ないのではないかと考えられた。各海域での沿岸・湾灘全域での沿岸域濃度と全域濃度の比 C-Ratio を検討した結果、紀伊水道が最も大きく、大阪湾、備讃瀬戸の順であったが、紀伊水道が最大という点には疑問が残るとしている。C-Ratio を水質制御指標として、各水域での陸域負荷量削減対策による沿岸域での水質改善効果の現れやすさについて検討した結果、陸域での負荷削減対策が効果を上げるのは紀伊水道、大阪湾であり、播磨灘、安芸灘、広島湾、別府湾は効果が現れにくいとしている。

橋本らによる1993年(10月)、1994年(1, 4, 6月)の観測データから、形態別窒素・リン・珪素の海域別・季節別変化についての検討が行われた(林ら, 2000)。瀬戸内海全体の年平均では DOP, DIP, POP の現存割合は1/3程度であり、窒素も同様であった。生物活動が活発なために全体的に DIN の割合が低くなり、DON が高くなる。特に4月燧灘～伊予灘・周防灘にかけて DIN が非常に低い。10月は DIN の比率が高くなり、DON が低くなる。海域別では広島湾北部でプランクトン含有窒素が年間を通して高く、大阪湾北部ではプランクトン含有率窒素は先の海域に比べて低い。この理由としては、同海域の基礎生産は瀬戸内海中最も高いが、陸水による栄養塩供給が過剰なためとしている。リンに関しては、総じて窒素同様の傾向となっており、4・6月の DIP 現存割合が DIN に比べて大きいこと、DOP の割合が DON に比べて低いことが異なる点である。この傾向は瀬戸内海西部で顕著である。これらのことから、瀬戸内海西部海域での基礎生産が窒素制限の傾向にあることを示しているとしている。Si/DIP, DIN/DIP の海域別分布から、大阪湾での Si/DIP は年間総じて低く、ケイ藻の生産が制限される可能性の高い海域としている。DIN/DIP では、西部海域で4, 6月ともに低い傾向にあり、窒素制限傾向であり、備讃瀬戸以東海域では DIN/DIP がレッドフィールド比を上回っており、リン制限傾向であるとしている。

フェリーによる DIP, DIP, DSi 観測データ(1994～2000年)から、鉛直混合が盛んな冬季の観測結果を利用し、海域別の栄養塩特性を分析した(柳・原島, 2003)。7年間平均の冬季栄養塩分布から、DIP は、瀬戸内海東部で高く、西部で低かった。大阪湾は他海域の2～3倍であった。DIN は、別府湾を除くと DIP と同様な傾向にあった。大阪湾は他海域の4～9

倍であった。DSi は、別府湾、大阪湾で高く、燧灘でわずかに高く、伊予灘で最も低かった。また、海域別に陸域からの負荷量を推定した結果、単位容積あたりでは TN, TP 負荷量は備讃瀬戸と大阪湾で大きい。DIP, DIN を海域別分布から見ると大阪湾は対応しているが、備讃瀬戸は対応していない。播磨灘は備讃瀬戸より負荷量は小さいのに DIP, DIN は逆に大きい。この理由としては、備讃瀬戸の強い潮流により、負荷された栄養塩は速やかに播磨灘、燧灘に輸送されると同時に、大阪湾から播磨灘への栄養塩が輸送されてくるためとしている。DSi 負荷量に関しては、備讃瀬戸、別府湾、大阪湾の順となっている。しかし、備讃瀬戸では DSi 濃度は低く、潮流による水平輸送が大きいためであるとしている。DIN/DIP, DSi/DIP, DSi/DIN の海域別分布から、大阪湾は、著しく N/P が高く Si/N が低い。これは淀川の人為的負荷が大きいこと、琵琶湖での植物プランクトン増殖による珪素取り込みによる結果としている。別府湾は河川流量が相対的に多いので Si/P が大きい。各水域間での栄養塩フラックスの推定を行った結果、DIP は大阪湾から別府湾までの水平輸送が存在する。DIN に関しては、大阪湾から燧灘への水平輸送、安芸灘・別府湾から伊予灘への水平輸送がある。DSi は大阪湾から備讃瀬戸經由播磨灘、燧灘から備讃瀬戸・安芸灘、安芸灘・別府湾から伊予灘への水平輸送があるとしている。

環境省により実施されている瀬戸内海総合水質調査で取得された TP, TN 濃度から1981～2000年の冬季水域別平均値を使用して、瀬戸内海における陸域と外洋起源の TP, TN 濃度推定を試みている(石井・柳, 2004)。大阪湾では陸起源の TP が6割、TN が7割も存在し、陸域からの影響が支配的であることが分かった。これは同湾への TP, TN 負荷量が瀬戸内海総負荷量の1/3と非常に多い上に、内海最大の流量の淀川を経由して湾内に流入するためであるとしている。一方、瀬戸内海西部では外洋からの寄与率が8割以上を占めており、東西で対照的な水域特性を有することが判明した。各水域における外洋起源 TP, TN 濃度変動が紀伊水道・豊後水道のどちらを通じて影響を強く受けているかについて検討した結果、平均的には TP, TN ともに備讃瀬戸付近を境に西では豊後水道、東では紀伊水道を通じての影響が有意であるとしている。以上までが柳らの一連の研究である。

瀬戸内海での外洋起源の栄養塩比率に関しては、武岡・柳(前述)をはじめとしたいくつかの研究がある。これらを比較するとそれぞれの研究でこの比は異なっているが、外洋起源窒素比率は2/3程度であるとしている(武岡ら, 2005)。解析においては、河川からの

栄養塩供給なしの場合での瀬戸内海の栄養塩濃度は豊後・紀伊両水道に接する栄養塩濃度と等しくなるという考え方から算出した栄養塩濃度を Background 濃度とした。この見積もりは Background 濃度をどの程度にするかなど問題点があるものの、外洋起源が少なからず影響していることを示している。

外洋域に接続している豊後水道、紀伊水道からの栄養塩供給については、笠井ら (2001)、高志ら (2002)、藤原ら (2003)、武岡 (1996)、兼田ら (2002)、速水ら (2006) が系統的な研究を継続的にを行い、両水道からの栄養塩供給は無視出来ない量であることが指摘されている。一連の研究を総括してみると以下のようなことが言える。

紀伊水道においては、栄養塩の流出入は黒潮の離岸に大きく影響を受けており、黒潮接岸期においては主として栄養塩の流出が主であり、黒潮が離岸していると底層からの栄養塩の流入が卓越する。ただし、この現象は夏期に限られ、冬季は黒潮の離岸に係わらず、流出傾向にあるとしている。豊後水道では、以前から急潮と呼ばれる黒潮暖水の表層侵入とこのイベント後に底層の栄養塩が増加することが知られている。急潮後に湾外からの低温水（陸棚斜面起源）侵入がその原因と考えられている。加えて、武岡らが「底入り潮」という底層からの低温・高塩分水塊が宇和海にまで侵入しており、この二つの現象が外洋からの栄養塩供給メカニズムであるとしている。さらにこれらの現象は周辺海域での動植物プランクトン組成にも大きく影響を与えているとしている。両水道での高栄養塩水塊の侵入は、いずれも黒潮の離岸に大きく関係していると見られる。ただし、紀伊水道では黒潮離岸時、豊後水道では九州東岸への黒潮接岸時にそれぞれ高栄養塩・低温水（陸棚斜面の冷水）の侵入が見られる。これは、それぞれの水道周辺の地形条件、陸棚斜面起源の冷水領域、黒潮の位置関係及び黒潮の動きによって生起条件が異なってくるためと考えられる。その直接的影響範囲は、紀伊水道側では大阪湾西部海域、豊後水道では伊予灘南部海域に及んでいるとしている。従って、間接的にはそれよりかなり広い範囲に影響を与えるものと考えられる。外海から流入する栄養塩濃度は、紀伊・豊後水道ともに水温との相関が高い。

藤原ら (2006) は、豊後水道の水深100m 水温と細島の水位がほぼ連動していることから、細島の水位の長期データから100m 水温の長期変動を推定した。水温と栄養塩濃度は高い負の相関があるので、これを用いて100m での栄養塩濃度長期変動を推定した。その結果、数十年スケールの変動があり、硝酸態窒素濃度は7～9 μM で変動している。変動のパターンは大

まかに紀伊水道と共通しており、1980年代後半は低温・高栄養塩期となっている。また、大阪湾での栄養塩・水温変動を分析して、外海から流入する栄養塩量の30年間の経年変化を調べた。大阪湾西部底層には、紀伊水道から外海起源の栄養塩が流入しており、この流入が大阪湾内の水質に影響を与えている。また、外海から大阪湾への栄養塩の流入量には大きな経年変化があり、1980年代後半に極大があり、その後減少し、1990年代後半には極大時の約2分の1になったことから、この変動が瀬戸内海の水質の長期変動に影響を及ぼしているとしている。外洋からの栄養塩供給の多寡は、陸棚斜面水の動きにより決定されており、黒潮の動きが大きく影響していることを示している。

河川水に含まれる栄養物質は、無機溶存態、有機溶存態、懸濁態 (POM) 等である。これらは源流、上流域、中流域、下流域で変化しているが、沿岸域では河口域でのこれらの量が重要になる。また、河口域は海水と河川水が混合する領域である。河川水に含まれる栄養塩は、流域の土地利用、点源負荷 (工場、畜産場、污水处理場等)、地質構造等で変化する。河川水に含まれる栄養塩濃度は季節的にも変化する。例えば、新井ら (2006) は利根川の栄養塩を年間測定したが、その結果、秋期・冬季には硝酸態窒素は200 $\mu\text{mol/l}$ と、春期・夏期に比べて2倍の濃度となることを報告している。さらに出水時における硝酸態窒素濃度を連続計測し、出水に伴う濃度変動はそれ程大きくないことを報告している。また、懸濁態に含まれる窒素・リンは、SS 濃度と比較的相関が高いことも報告している。山本ら (2003) は涸沼川水系 (農地河川)、白川 (阿蘇カルデラ集水域) について、観測を行い、溶存態・懸濁態、濁度 (SS 濃度)、流量の関係を検討している。その結果、同様に SS 濃度と窒素・リンは相関が高く、SS は流量と関係があるが、一般にその関係はヒステリシスカーブとなる。一方、溶存態窒素 NO_3 はヒステリシスではなく流量とほぼ一次の線形関係にある場合が多いとしている。それぞれの河川は、土地利用や点源負荷等に応じて異なっており、この点についてさらに詳細な検討が必要になる。しかし、河川データは、TN, TP, SS データに限られていることが多く、溶存態に関するデータは少なく、溶存態栄養塩をこれらのデータから推定せざるを得ない状況にある。

平水期あるいは渇水期には、流速が遅いうえ、ダム、河口堰など流域に滞留域がある場合には、水温が植物プランクトンにとって適切であるならば増殖する結果、溶存態が減少し、懸濁態に移行するメカニズムが働く。しかし、水温が低い状態では起こりにくいと考えられる。冬季に栄養塩が高くなるのは、流域での

負荷発生状況も絡んでくるが、河川水域においての一次生産の活性が低くなることも大きな要因の一つではないかと考えられる

底質・ベントス等 (レビュー)

水質に影響を与える重要な問題として、瀬戸内海における底質分布がある。海域での生産過程や陸水からの有機物負荷により、有機物は海底に堆積する。堆積した有機物は、ベントス、細菌類等により、消費分解される。しかし、負荷量が多くなると未分解の有機物の堆積が増加し、これまで良好であった底質環境が悪化し、夏期の貧酸素化、底質からの栄養塩溶出増加による内部生産の増加によるさらなる貧酸素化・有機物の堆積という悪循環サイクルに陥る。通常環境であればベントス類が生息し、適切な物質循環が行われるが、有機汚泥化した領域では、夏期の貧酸素化等によりベントス類の避難あるいは斃死が発生する結果、ベントス群集のサクセッションをストップ (またはリセット) させてしまう。

せとうちネット (2009) に底質の含泥率、COD、マクロベントス種類・個体数の分布が公表されている。含泥率分布を見ると、瀬戸内海の流れを反映し、流れの速い海域では、含泥率が低く、閉鎖度が高い海域ほど高い分布となっている。COD の分布もほぼ同様である。マクロベントスの個体数・種類数に関しては、含泥率・COD の分布とは異なり、閉鎖性が高い海域の主要な領域では少なく、むしろ流れの強い海域周辺に多い傾向にある。個体数・種類数のみでなく、その構成及びその経年変化が重要であると考えられるが、この分布を見るだけでも、海域の特性を反映した分布特性を示しており、各海域の生産性、負荷、水理環境が密接に関連していることが伺える。大阪湾や広島湾での研究成果等から、底質からの栄養塩溶出は、季節的には夏期に大きく、冬季に少ないと考えられる。特に夏季における貧酸素化は、大阪湾、広島湾奥では深刻である。こうした底質からの栄養塩供給は、瀬戸内海の低次生産や環境を評価する上では無視することは出来ない。

数値モデル

1 数値モデル概要

既に述べたが、瀬戸内海は非常に複雑な地形をしていること、周防灘などのように浅く、奥には干潟が広がっている領域もある。河川流量も多い。このことから、流動の数値モデルを適用する場合には、①地形効果を良く反映出来ること、②淡水流入に伴う密度成層の形成を良く再現出来ること、③外洋の条件や気象(風

向、風速、気温、湿度、全天日射量、雲量等)を入力しやすいこと、④計算メッシュを小さくするために計算容量が大きくなることからロバスト性に優れていること、⑤生態系(栄養塩も含む)モデルを容易に組み込めること、⑥ネスティングや可変格子形成が容易なことなどを考慮する必要がある。

海洋流動モデルとして、最も広く利用されているのが、プリンストン・オーシャンモデル (POM) である。POM は、以下に示すように、3次元の流動モデルであり、拡散係数を水平方向についてはスマゴリンスキー型とし、鉛直方向については乱流輸送エネルギー方程式 (Mellor & Yamada, 1982) から求めるようになっている。計算の手順としては、まず、2次元の流れを計算し (外部モード)、それより長い時間間隔で傾圧的な流れを計算するようになっている (内部モード)。風応力は海面摩擦係数を介して、水塊に作用する。POM の計算に関する記述は付録に示す。

POM の問題点としては、 σ 座標系でのスカラー量輸送計算における数値分散の介入がある。直交座標系における密度の定義位置と σ 座標系における密度の定義位置が異なることによる計算上の誤差である。POM をベースに様々な改良が加えられ、ROMS, ECOMSED, EFDC などが開発された。その過程の中で問題点である数値分散等が改善された。POM 自身は様々なユーザーにより改良されるとともに、生態系モデル、気象モデルと結合したモデル等が開発され、海洋分野や地球温暖化問題で利用されているが、これらすべてが公開されているわけではない。モデルの基本的特徴 (拡散係数、座標系、干出・遡上モデルの有無、土砂の移流拡散・堆積モデル有無等) の一覧表を示す (Table 1)。

瀬戸内海に適用するモデルは、先に述べた流動、水質、底質等に関する課題群に適切に対応出来るモデルでなければならない。著者らは、以前から開放性沿岸域である鹿島灘・九十九里を対象に流動・低次生産モデルの開発を行ってきた。そのベースは POM である。これに低次生態系モデルを結合させている。同海域には黒潮、親潮続流が存在し、外洋の流れが直接沿岸域に波及する。このため、これら海流を適切に考慮することが必要である。また、利根川、那珂川という1級河川があり、これらの影響 (淡水流入、懸濁物、栄養塩等) を考慮することも必要である。前者については POM と沿岸・外洋観測値を用いた同化モデルにより求められる流動、水位、塩分・水温が、既に FRAJCOPE, JCOPE データ (1日平均) で公表されており、このデータを利用することができるようモデルを構築している。後者については、河川データを

Table 1. Characteristics of hydro dynamic models

表 1. 流動計算ソフトウェアの特徴

Model	Source Code	Vertical turbulence model	Horizontal mixing	Sediment	Morphology	Synography	Wetting/ Drying	Language	Horiz. Discretization	Horizontal Grid	Vertical Grid	Parallel Processing	Wave forces	Bedload	Sediment Buoyancy	Bank Erosion
ADCIRC3D									FE							
CH3D	P	ARAP	Y				Y	F90		C, I	S, Z	Y	Y			
CH3D-IMS	P	ARAP	Y				Y	F90		C, I	S, Z	Y	Y			
CH3D-WES	PDL	KE	Y							C	S, Z					
COHERENS	PD	MY25, KE	Y	Limited	N	N	Y	F77	FD	R, S	S	N	N	N	N	N
DELFT3D	P	KE	Y	B	Y	Limited	Y	F77	FD	R, C	S, Z	N	Y	Y	Y	Beta
ECOMSED	PD	MY25	Y	B	N	Y	N	F77	FD	R, C	S	N	N	N	N	External Input
EFDC	PD	MY25	Y	B	Y	Y	Y	F77	FD	CO	S	On Cray MPI Soon	Y	Y	Y	Y
GETM	O	KE	Y	N			Y	F90/95	FD	C	S	Y				
HAMSON	P							F90			Z					
HYDRO3D/SED3D																
Mars3D									FE							
MECO	C	MY25, KE	Y	Y		Y	Y	C	FD	C	Z					
MIKE3D	P	KE		E												
MOHID							Y									
NCOM	PDL	MY25	Y	Beta	N	N	N	F90	FD	C	M	Y	N	N	N	N
POLCOMS	PDL	MY25	Y	Y	N	N	N	F10	FD	B	S	Y	N	N	N	Y
POM2K, OZPOM	PD	MY25	Y	N	N	N	N	F77	FD	C	S	Y	N	N	N	N
QUODDY4	PD	MY25		N			N	F77 or C	FE	Z	S	Y	N	N	N	
RMA10-11		MY25														
ROMS	C	MY25, GLS, KPP		B	Y	Limited	N	F77	FD	C	S	Y	N	N	Y	N
SHORECIRC	PDL			N	Y				FD				Y	Y	?	N
SYMPHONIE	PDL	K + prognostic	Y	C		N	N	F77	FD	R	S	N	Y	N	N	N
TELEMAC-3D	P						Y									
TRIM	P								FE							
UnTRIM	P															

Notes:

Source code: Proprietary (P), Copywrite (C), Open (O), Public domain (PD); limited distribution PDL

Turbulence models: Mellor-Yamada 2.5 (MY25), Generic length scale (GLS), K-epsilon (KE), K-omega (KW), Aeronautical Res. Associates of Princeton (ARAP)

Sediment: Non-cohesive (N), Cohesive (C), both (B), either (E)

Horizontal Grid: Rectangular (R), Curvilinear (C), Spherical (S), Irregular (I)

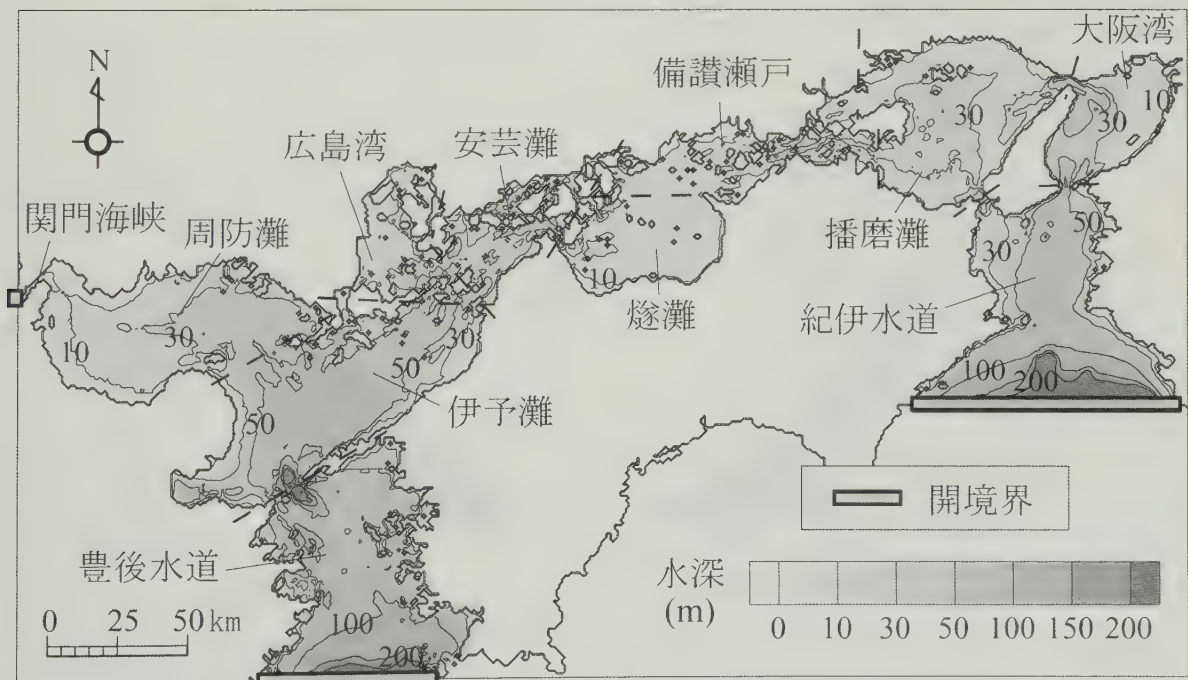


Fig. 2. Calculation domain of the Seto Inland Sea.

用いて淡水流入、栄養塩供給等もモデルに組み込まれている。POMは、他のモデルよりコード数が少なく、比較的容易に改良できることが大きな利点である。先に挙げた諸課題に対応する基本的なモデルを構築するために、このモデルを用いることが最も効率的と考え、瀬戸内海に適用出来るように改良を加えた。なお、本モデルは現在でも多重ネスティング、干潟での干出・冠水等種々の改良作業が継続されている。ここでは、途中の段階の計算結果等を紹介する。なお、低次生態系モデルはKKYSモデル（Kawamiyaら、1995）をベースとし、リンのコンパートメント及び底泥の栄養塩溶出項を組み込んでいる。

以下にモデルの概要、条件等を述べる。

瀬戸内海モデルの計算領域は、瀬戸内海全域を含む南北234km、東西421kmの領域とし、豊後水道、紀伊水道、関門海峡を開境界とした（Fig. 2）。

既に述べたが、瀬戸内海の流れを駆動する主要な外力は潮汐及び風である。潮流は往復流であるため、正味の物質輸送は潮汐残差流・吹送流・密度流によって決定される（柳，1992）。物質量の供給源は河川（陸起源）、底泥からの溶出に加えて、前述したように外洋からの供給が重要であることが明らかにされてきた。瀬戸内海モデルを構築する際には、上記の影響を適切に取り込むことが重要である。

Table 2に瀬戸内海モデルの概要を示す。主要な外力である潮汐は、紀伊水道と豊後水道の開境界に天文潮位を与え、風は気象庁のGPV（RSM）データを使用して時空間的な変化を考慮した。河川は瀬戸内海に流入する21の1級河川を考慮し、底泥からの栄養塩溶出量は山本ら（1998）の結果を時間的にスプライン補

Table 2. A table of conditions used in the Model.

項目	内容	
計算領域	南北234 km, 東西421 km	
計算格子	水平方向	直交座標 1,000 m
	鉛直方向	σ座標 10 層
分割時間	External Mode = 3.0 秒, Internal Mode = 18.0 秒	
境界条件	潮汐	天文潮位(豊後水道, 紀伊水道)
	水温・塩分	JCOPE同化データ
	NO ₃	0.95 μmol/L : 水深40 m以浅 50 - 2.6 × 水温 μmol/L : 水深40 m以深
	PO ₄	NO ₃ /14 μmol/L
気象条件	風, 気温, 気圧 相対湿度	GPVデータ (気象庁)
	全天日射量, 雲量	気象観測所データ (気象庁)
河川	21の1級河川のデータ (国交省) を設定	
	流量・水温	観測値
	水質濃度	採水データを元に一定値を設定

間して海域ごとに設定した。外洋の流速・水温・塩分は、JCOPE 同化データ（宮澤・山形，2003）を開境界に与えた。JCOPE データの空間分解能は本計算の空間分解能より大きいので、内挿して境界値として用いた。外洋の硝酸塩（以下、NO₃）及びリン酸塩（以下、PO₄）は、日本海洋データセンター（以下、JODC）のデータを解析して得られた水温と NO₃ 及び NO₃ と PO₄ の関係式（Fig. 3）を使用して、開境界の水温から NO₃、その NO₃ から PO₄ を算出して開境界に与えた。ただし、40m 以浅では水温と NO₃ の間に明確な相関関係は見られなかったため、40m 以浅の平均値を与えた。

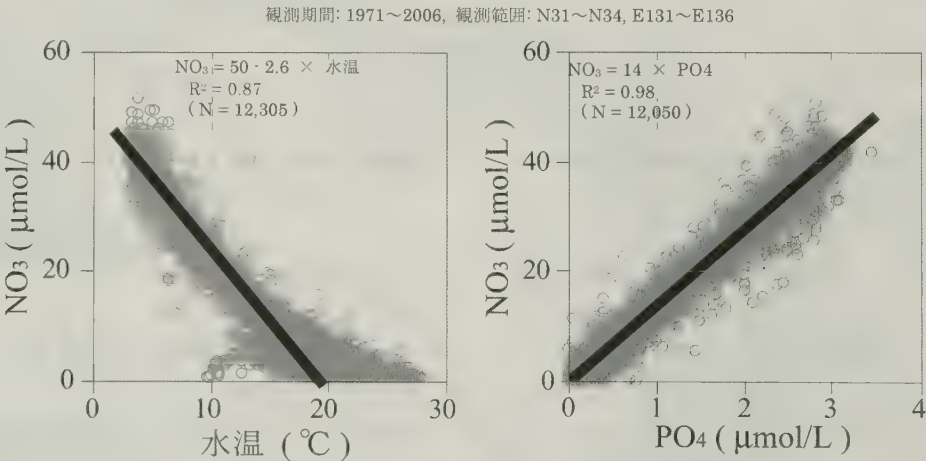


図 3. NO₃ と水温及び NO₃ と PO₄ の関係

Fig. 3. The relationships between NO₃ and water temperature and PO₃.

2 モデルの計算結果

(1) 流動場計算結果の検証

流れを駆動する主要な外力である潮位の再現性については、気象庁による観測潮位と計算結果の水位をそれぞれ調和分解して得られた分潮成分 (M2, S2, K1, O1, K2, N2, P1) の振幅及び遅角を比較した (Fig. 4)。その結果、相関係数はそれぞれ0.94及び0.98であり、潮位の再現性は良好であると考えられた。正味の物質輸送を支配する循環流、恒流は柳ら (1992)

など多数の研究がなされており、大阪湾の時計回りの沖ノ瀬環流や広島湾の反時計回りの循環流が知られている。計算による1年間の表層平均流速から (Fig. 5)、それら既知の循環流等を概ね表現できていることが確かめられた。藤原ら (2006) によると、瀬戸内海を通過する流量は10年スケールの変動があるが、豊後水道から流入して紀伊水道から流出する年が多い。計算による月ごとの平均流速と水深から通過流量を算出した結果、2005年は豊後水道から流入して紀伊水道から

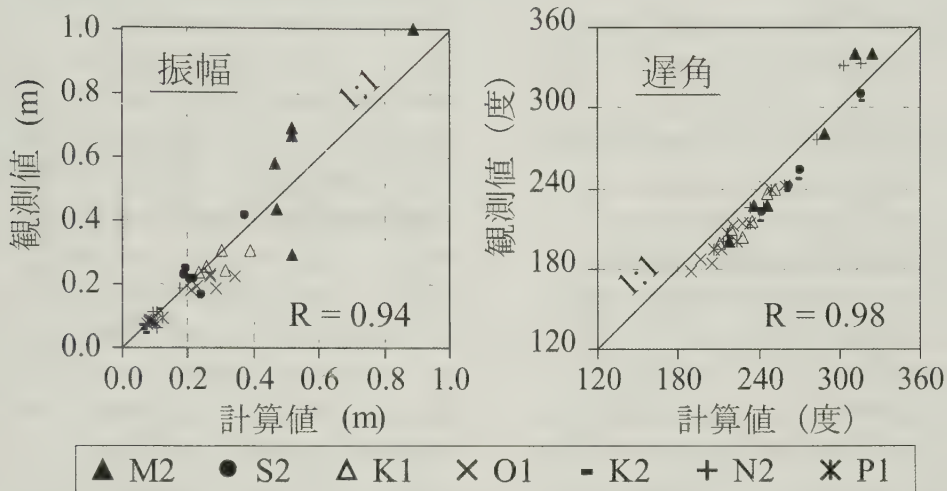


Fig. 4. Comparison of field data to calculated data (amplitude and phase of tide).

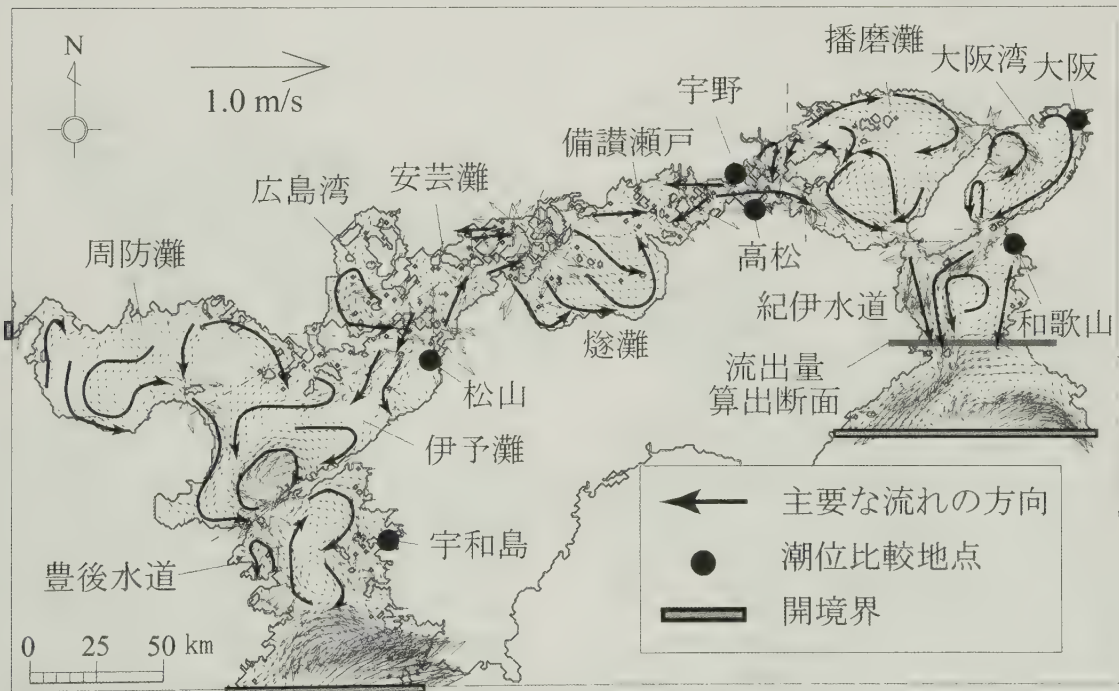


Fig. 5. Calculated residual current vector (surface).

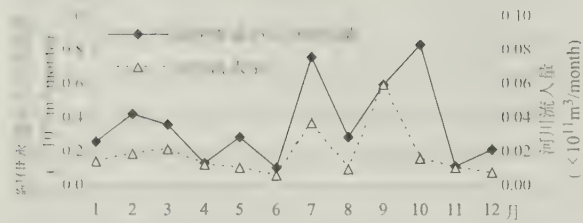


Fig. 6. Water discharge rate of the Kii channel and 21 rivers in the Seto Inland Sea coast.

流出する傾向がみられ、その流出量は瀬戸内海に流入する21の1級河川の総流量の10倍程度であった (Fig. 6)。

以上より、本モデルは瀬戸内海の流動場を概ね再現できているものと考えられる。

(2) 水温、塩分及び低次生産計算結果の検証

水温、塩分、 NO_3 及びクロロフィルa (以下、Chla) について、瀬戸内海総合水質調査データ (以下、瀬戸内総合) 及び各県の浅海定線データ (以下、浅海定線) の各海域平均値と計算結果を比較検証した。Fig. 7に両データの観測地点を示す。水温に関しては、観測結果では、2005年の瀬戸内海における水温は3月頃に10℃程度の極小値をとり、4月以降に水温の上昇に伴い水温成層が発達して8月に表層と底層の水温差が最も大きくなる (Fig. 8最左列)。表層水温は9月に約25℃の極大値となり、底層水温は10月に極大値とな

る。計算結果は、紀伊水道の8月、9月では実測値に比べて水温は高めであるが、それを除けば、観測結果を適切に再現できているものと考えられる。塩分に関しては、観測結果では、外洋に面した伊予灘及び紀伊水道以外では、量的な差はあるものの時間の経過と共に高塩分化する傾向があり、燧灘以東で特にその傾向が強い (Fig. 8左から2列目)。計算結果の塩分は、そのような高塩分化の傾向を概ね再現しているものの、全体的に観測結果より高めであった。瀬戸内海に流入する2級河川の流域面積の合計は1級河川の約1/2に相当する (せとうちネット, 2009)。それゆえ、1級河川のみを考慮した本モデルでは、流入する淡水量が実際よりも少なかった可能性がある。更に、塩分の初期値を瀬戸内海全域の観測値が入手できた瀬戸内総合の2005年冬季データ (1月～3月) から作成したため、計算初期値が実際の1月の塩分より幾分高めであった可能性もあり、今後改善する必要がある。また、図には示していないが、塩分・水温分布による成層強度を見ると、計算結果は観測結果よりも弱く、モデルにおいて混合が過大である可能性がある。これは栄養塩輸送、低次生産に直接影響するので、改善する必要がある。改善方策としては、拡散係数の再検討や鉛直分割数の増加などが考えられる。

なお、2005年当初の塩分は平年に比較して低い傾向にある。これは前年の2004年に台風等による出水が多かったためと考えられる。

観測結果では、 NO_3 は1月から減少傾向で3月、4

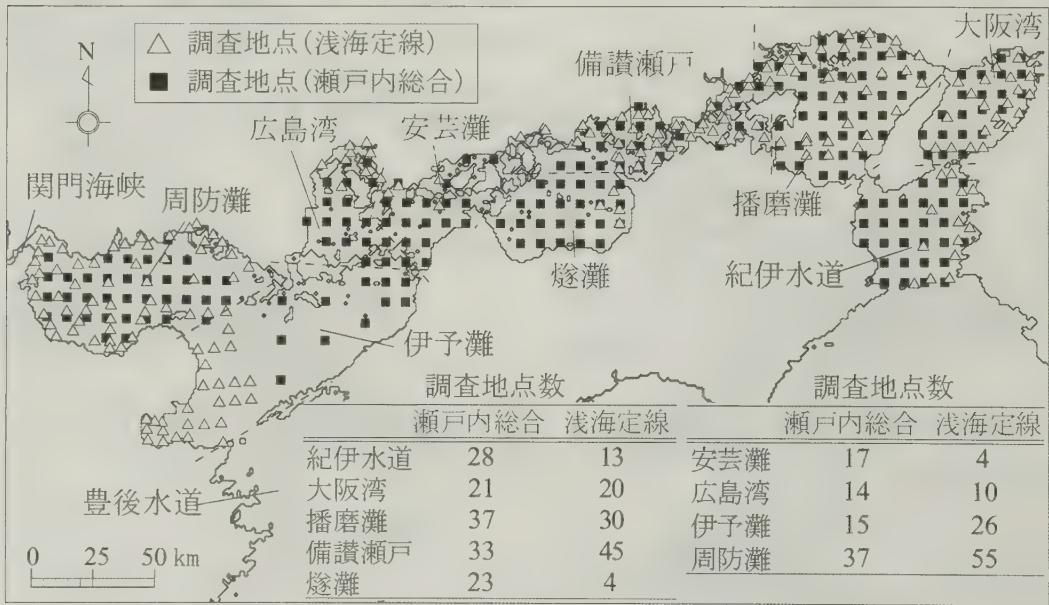


Fig. 7. Location and number of observation points.

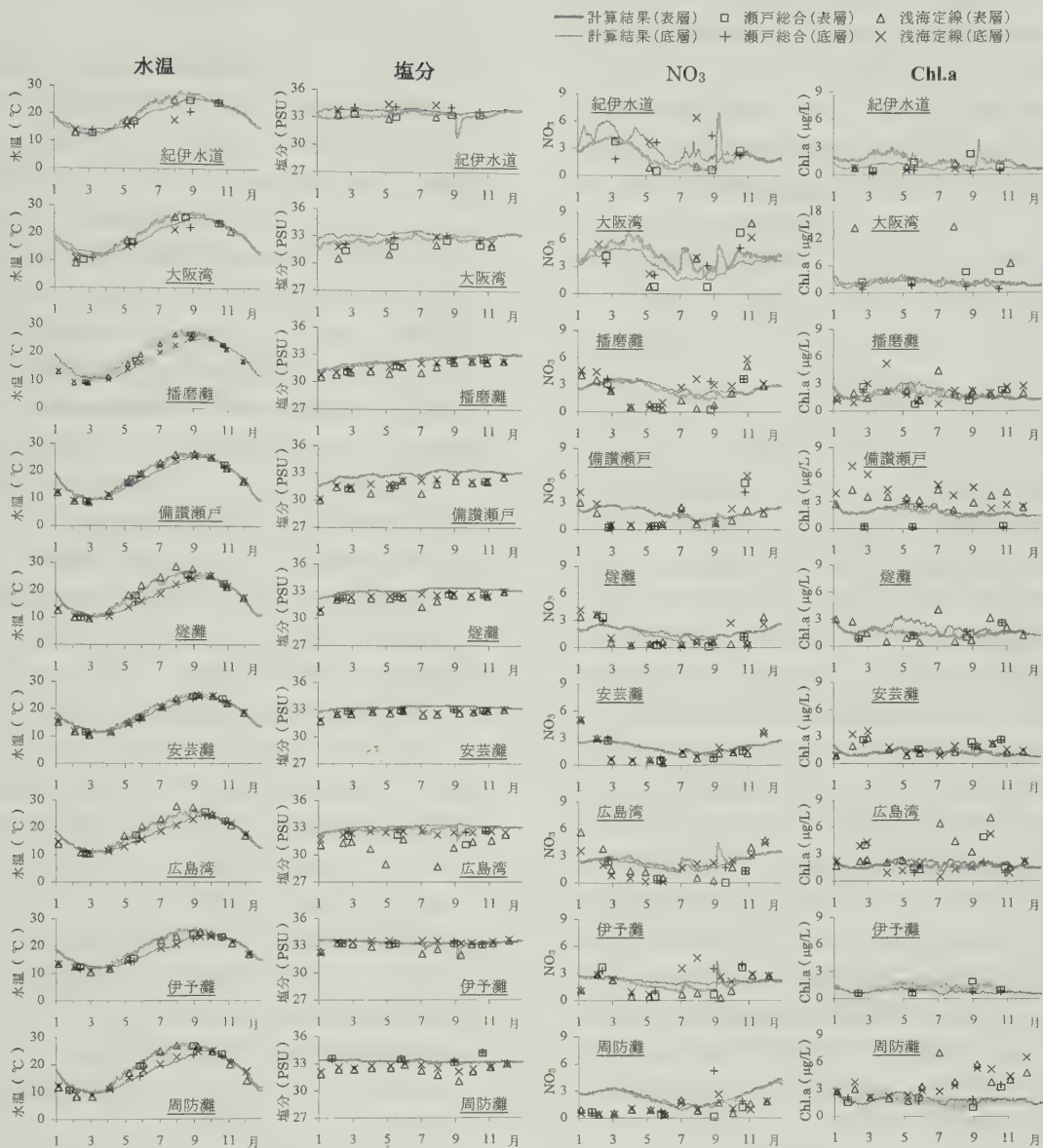


図8. 計算結果と観測値の比較

Fig. 8. Field data and calculated data.

月には1.0mmol/L以下まで減少している。4月から6月は低濃度で推移し、7月から9月は海域ごとに傾向が異なり、10月以降は増加傾向であった (Fig. 8右から2列目)。一方、Chl.aは NO_3 が大きく減少する3月又は4月に極大となり (春季ブルーム), 次の月には減少して安芸灘や広島湾では1/2以下になっている (Fig. 8最右列)。4月以降は、7月、8月に表層、9月、10月には表層と底層で一時的にChl.aが増加している海域がある。計算結果では、夏季に NO_3 が低く秋季

から冬季に濃度が上昇する傾向を再現しているが、春季における NO_3 の枯渇状況は再現できていない。これは、春季のChl.a極大を過小評価したためと考えられる。春季以降は、Chl.aの全体的な濃度は概ね再現できているが、一時的に高濃度となる状況は再現できていない。春季ブルームを再現できていない原因としては低次生産モデルのパラメータ設定及び計算開始から2ヶ月後であるため、各物質が春季ブルームを再現しえる濃度ではなかったことが考えられる。今後は、

複数年にわたる検証などを通じて春季ブルームや一時的な Chl.a 濃度の上昇を支配する要因を解明し、モデルの精度を向上させる必要がある。

なお、図には示していないが、紀伊、豊後両水道の底層から栄養塩が瀬戸内海に輸送されており、その強さは外洋の条件（境界条件）により変動していることが計算結果に現れている。詳細な検討は今後行う予定であるが、前述した外洋からの栄養塩供給機構を反映していると考えられる。

まとめ

以上より、これまでの調査研究成果レビューを行い、諸課題の解決に向けて必要な基本的な流動・低次生態モデルを、流動モデルとして POM、低次生態系モデルとして KKYS モデルをベースに開発し、瀬戸内海に適用した。低次生態系モデルの諸パラメータは基本的に KKYS のデフォルト値を用いており、再現性に課題を多く残している。瀬戸内海における基礎生産調査データ等による生態系モデルのパラメータの見直し、生態系モデルの構造、底泥からの溶出過程等を詳細に検討する必要がある。さらには流動モデルにおいても、既に述べたように混合が過大気味のために成層強度が弱めの計算結果を与えているなどの問題がある。これらの点に関しては、現在、鋭意改良作業を継続している。また、干潟上の流れなどを精度良く再現するために一部領域をより解像度を上げる多重ネスティングや干出・冠水を表現出来る移動境界などの検討も行っている。本論文では基本モデルの紹介にとどめているが、上記の改良・開発に関しては成果が出次第報告する予定である。

今後、本モデルとデータベース、現地観測等を総合的に利用することにより、水産有用種の産卵場から幼生分散・着底過程の検討、着底場における生産環境評価、漁場環境の改善効果評価、中長期の瀬戸内海環境変動予測、準リアルタイム流動・低次生産情報把握などについて検討することを考えている。

なお、浅海定線データ等の提供等に関しては、瀬戸内海沿岸の各県の水産試験場並びに県職員の方々に協力頂いた。1 級河川の流量、水質データの提供は該当する 21 の 1 級河川の国交省下流事務所の方々に協力頂いた。それぞれ関係機関、氏名を明記すべきところですが、あまりに多いので、省略させていただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 阿保勝之, 杜多 哲, 藤原建紀, 2006: 冬季の東部瀬戸内海における残差流と栄養塩環境. 海岸工学論文集, **53**, 1096-1100.
- 新井雅之, 中山哲殿, 足立久美子, 齊藤 肇, 奥西 武, 八木 宏, 2006: 鹿島灘・九十九里浜沿岸での一次生産に及ぼす利根川・那珂川の影響について. 海岸工学論文集, **53**, 1101-1105.
- 藤原建紀, 小林志保, 高志利宣, 2003: 瀬戸内海の窒素・リンの輸送と起源の現地観測. 海岸工学論文集, **50**, 951-955.
- 藤原建紀, 小林志保, 國井麻妃, 宇野奈津子, 2006: 瀬戸内海に存在するリン・窒素量の経年変動. 沿岸海洋研究ノート, **43**(2), 129-136.
- 浜走幸育, 日比野忠史, 駒井克昭, 松岡純作, 2001: 瀬戸内海における湾・灘水塊の移流・交換量の季節変動特性. 海岸工学論文集, **48**, 1036-1040.
- 橋本俊也, 山本民次, 多田邦尚, 松田 治, 永末寿宏, 1997: 瀬戸内海の一次生産と海洋構造. 沿岸海洋研究ノート, **35**(1), 109-114.
- 速水祐一, 兼田淳史, 小濱 剛, 中野伸一, 武岡英隆, 2006: 豊後水道における外洋起源栄養塩の供給機構とその生態系への影響. 沿岸海洋研究ノート, **43**(2), 143-149.
- 石井大輔, 柳 哲雄, 2004: 瀬戸内海各灘・湾における全リン・全窒素の起源と濃度変動機構. 海の研究, **13**, 389-401.
- 石井大輔, 柳 哲雄, 2005: 瀬戸内海の沿岸域と全域における TP・TN 濃度変動. 海の研究, **14**, 35-45.
- 石井大輔, 柳 哲雄, 2006: 瀬戸内海に存在する太平洋起源のリン・窒素. 沿岸海洋研究ノート, **43**(2), 119-127.
- 笠井亮秀, 藤原建紀, 多田光男, 2001: 紀伊水道の海洋構造と栄養塩輸送. 海岸工学論文集, **48**, 436-440.
- 兼田淳史, 乗松桂輔, 渡辺浩三, 小泉喜嗣, 武岡英隆, 2002: 黒潮の離接岸が豊後水道の水温に与える影響. 沿岸海洋研究ノート, **39**(2), 181-188.
- Kawamiya, M., M. Kishi, Y. Yamanaka, and N. Suginoara, 1995: An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa. *J. Oceanography*, **51**, 635-664.
- Kobayashi, K. and T. Fujiwara, 2006: Physical and biochemical responses to decadal variability of shelf water intrusion in the Seto Inland Sea,

- Japan. Workshop on Coastal Observatories - Best practice in the synthesis of long-term observations and models, Proudman Oceanographic Laboratory (Liverpool, UK).
- 小林志保, 藤原建紀, 高杉由夫, 2006: 陸岸に囲まれた潮汐フロント域における物質輸送機構. 海岸工学論文集, **53**, 921-925.
- 駒井克昭, 日比野忠史, 清水勝義, 2002: 瀬戸内海における水位の季節変動量の推定. 海岸工学論文集, **49**, 381-385.
- 駒井克昭, 竹内健太郎, 日比野忠史, 松本英雄, 2003: 瀬戸内海における湾・灘間での海水交流量の推定およびその長期変動に関する研究. **50**, 921-925.
- 駒井克昭, 日比野忠史, 仁子幸子, 浜走幸育, 松岡純作, 2001: 瀬戸内海における栄養塩と一次生産力の分布・変動特性. 海岸工学論文集, **48**, 1106-1110.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851-875.
- 宮澤泰正, 山形俊男, 2003: JCOPE 海洋変動予測システム. 月刊海洋, **12**, 881-886.
- 李 寅鉄, 浮田正夫, 関根雅彦, 中西 弘, 1995: 瀬戸内海への栄養塩類の流入負荷解析と物質収支に関する研究. 海岸工学論文集, **42**, 1106-1110.
- 陸田秀実, 市位嘉崇, 秋山佳明, 土井康明, 2003: 局地気象モデルを用いた瀬戸内圏の風況解析と吹送流の応答特性. 海岸工学論文集, **50**, 436-440.
- 林 美鶴, 柳 哲雄, 橋本俊也, 2000: 瀬戸内海における窒素・リン現存量比率. 海の研究, **9**(2), 83-89.
- せとうちネット, 2009: 瀬戸内海的环境情報—自然環境に関する情報—. <http://www.seto.or.jp/seto/kankyojoho/sizenkankyo/top-data/hyoul-23.htm> 参照2009/5/17.
- 高志利宣, 藤原建紀, 住友寿明, 竹内淳一, 2002: 外洋から紀伊水道への窒素・リンの輸送. 海岸工学論文集, **49**, 1076-1080.
- 武岡英隆, 1996: 沿岸海洋と外洋の相互作用. 沿岸海洋研究ノート, **34**(1), 3-13.
- 田中陽二, 河原能久, 末永慶寛, 2005: 瀬戸内海全域における海水流動特性の数値実験. 水圏環境工学論文集, **1**(1), 9-14.
- 山本民次, 松田 治, 橋本俊也, 妹背秀和, 北村智頭, 1998: 瀬戸内海底泥からの溶存無機態窒素およびリン溶出量の見積もり. 海の研究, **7**(3), 151-158.
- 山本浩一・二村貴幸・坂野 章・日下部隆昭・末次忠司・横山勝英, 2003: 濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究. 河川技術論文集, **9**.
- 柳 哲雄, 1992: 瀬戸内海の流動とそれに関する諸問題. 海の研究, **1**(2), 9-19.
- 柳 哲雄, 原島 省, 2003: 瀬戸内海における溶存態無機リン・窒素・珪素分布の特徴とその要因. 海の研究, **12**, 565-572.
- *以下は, 本文中で引用していないが, 関係論文として掲載する.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, 1987: A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in "Three-Dimensional Coastal ocean Models" (ed. by N. Heaps), 1-16.
- 呉 碩津, 松山幸彦, 山本民次, 中嶋昌紀, 高辻英之, 藤沢邦康, 2005: 近年の瀬戸内海における有害・有毒渦鞭毛藻の分布拡大とその原因—溶存態有機リンの生態学的重要性—. 沿岸海洋研究ノート, **43**(1), 85-95.
- 速水祐一, 碓井澄子, 武岡英隆, 2004: 瀬戸内海における窒素・リンの存在量とその長期変動. 海と空, **80**(2), 75-78.
- 日比野忠史, 浅井 正, 細川恭史, 2000: 瀬戸内海における湾・灘での水質の季節変動特性. 海岸工学論文集, **47**, 1036-1040.
- 眞鍋武彦, 反田 寛, 堀 豊, 長井 敏, 中村行延, 1994: 播磨灘の漁場環境と植物プランクトンの変動—20年間のモニタリングの成果—. 沿岸海洋研究ノート, **31**(2), 169-181.
- 丸谷尊彦, 韓 銅珍, 中辻啓二, 2000: 大阪湾における水質の長期予測計算. 海岸工学論文集, **47**, 1051-1055.
- 中村充博, 小林弘二朗, 村上和男, 2005: 瀬戸内海の水質環境に及ぼす黒潮流路と外海の水況変動の影響. 海岸工学論文集, **52**, 361-365.
- 西田修三, 金 漢九, 高地 慶, 入江政安, 中辻啓二, 2006: 紀淡海峡における水質変動特性と栄養塩輸送. 海岸工学論文集, **53**, 996-1000.
- 陸田秀実, 土井康明, 稲山丈晴, 2002: 瀬戸内海における栄養塩構成比の季節変動と赤潮発生の関係. 海岸工学論文集, **49**, 1081-1085.
- 陸田秀実, 土井康明, 河村和憲, 亀山直記, 2001: 広島湾奥部の赤潮発生に及ぼす陸域起源の降雨量の影響. 海岸工学論文集, **48**, 1071-1075.

- 多田邦尚, 和田彩香, 一見和彦, 橋本俊也, 2006: 海砂利採取船からの高濁度排水中の微粒子の挙動—微粒子の特性と沈降速度—. 沿岸海洋研究ノート, **43**(2), 157-162.
- 武岡英隆, 速水祐一, 兼田淳史, 2005: 瀬戸内海における環境の長期変動. 沿岸海洋研究ノート, **43**(1), 45-50.
- 武岡英隆, 速水祐一, 兼田淳史, 松下太郎, 紀本岳志, 渡辺浩三, 藤川淳一, 2001: 瀬戸内海の栄養塩環境の長期自動モニタリング. 沿岸海洋研究ノート, **38**(2), 91-97.
- 柳 哲雄, 2001: 海洋環境モニタリングと情報ネットワーク—「せとうちネット」について—. 沿岸海洋研究ノート, **38**(2), 99-102.

付 録

流動・低次生産モデル

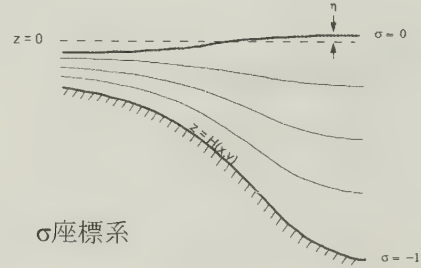
モデルは、流動を POM (Blumberg and Mellor, 1987) で計算し、一次生産過程を KKYS モデル (Kawamiya et al, 1995) にリンのコンパートメントを追加したモデルによって計算するものである。

1 基礎式 (POM、流動)

流動の計算に用いる POM は、水平面は直交座標 (デカルト座標)、鉛直方向に σ -座標を使用したモデルであり、海水の連続式、運動方程式、水温・塩分の輸送方程式、乱流エネルギー・乱流スケールの輸送方程式により構成されている。以下に、座標系の概念図及び各々の方程式を示す。

【 座 標 系 】

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = \frac{z^* - \eta}{D}$$



【 連 続 式 】

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (1)$$

【 x 方向の運動方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial uuD}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD \\ &= -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ &+ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

【 y 方向の運動方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial vvD}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD \\ &= -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ &+ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

(σ 座標に基準化された鉛直流速 ω とデカルト座標上の実流速 $\mathbf{w}$ の関係)

$$\mathbf{w} = \omega + u \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + v \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (4)$$

【 水温の輸送方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial uTD}{\partial x} + \frac{\partial vTD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} - \frac{\partial R}{\partial z} \end{aligned} \quad (5)$$

【 塩分の輸送方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial uSD}{\partial x} + \frac{\partial vSD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial S}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial S}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

【 乱流エネルギーの輸送方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 \omega}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial q^2}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial q^2}{\partial y} \right) \right\} \\ &+ \frac{2K_M}{D} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right\} + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} \end{aligned} \quad (7)$$

【 乱流スケールの輸送方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial uq^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial vq^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 l \omega}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial q^2 l}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial q^2 l}{\partial y} \right) \right\} \\ &+ E_1 l \left\{ \frac{K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right\} - \frac{Dq^3}{B_1 l} \tilde{W} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\tilde{W} = 1 + E_2(l/kL) \quad (9)$$

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{\eta - z} + \frac{1}{H - z} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \equiv \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad (11)$$

$$K_M = q l S_M \quad (12)$$

$$K_H = q l S_H \quad (13)$$

$$S_H [1 - (3A_2 B_2 + 18A_1 A_2) G_H] = A_2 [1 - 6A_1 / B_1] \quad (14)$$

$$S_M [1 - 9A_1 A_2 G_H] - S_H [(18A_1 2 + 9A_1 A_2) G_H] = A_1 [1 - 3C_1 - 6A_1 / B_1] \quad (15)$$

$$G_H = \frac{l^2}{q^2} \frac{g}{\rho_0} \left[\frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right] \quad (16)$$

$$(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (0.92, 16.6, 0.74, 10.1, 0.08)$$

表-0.1 変数一覧

変数名	内容	
x^*, y^*, z^*	デカルト座標	
x, y, σ	σ 座標	
η	水位	(m)
D	水深	(m)
u, v, w	x, y, σ 方向の流速	(m/s)
f	コリオリパラメーター	(1/s)
g	重力加速度	(m/s ²)
ρ	海水の密度	(kg/m ³)
K_M	鉛直渦動粘性係数	(m ² /s)
A_M	水平渦動粘性係数	(m ² /s)
T	水温	(°C)
S	塩分	(psu)
K_H	鉛直渦拡散係数	(m ² /s)
A_H	水平渦拡散係数	(m ² /s)
q^2	乱流エネルギー	(m/s)
$q^2 l$	乱流エネルギースケール	(m)
c_s	音速	(m/s)
S_M, S_H	成層化関数	
G_H	リチャードソン数	

2 生態系モデル

一次生産の計算に用いるモデルは、KKYSモデル(Kawamiya et al, 1995)にリンのコンパートメントを追加したモデルであり、以下に示す7つのコンパートメントから構成される。図-2.1に各コンパートメント関係図を示す。

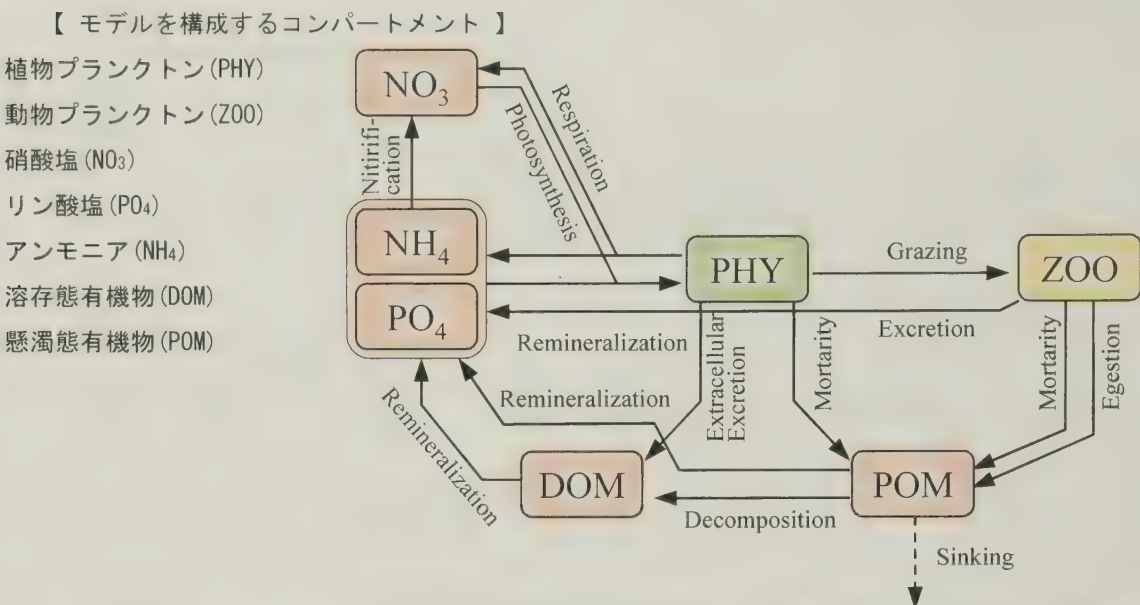


図1 一次生産モデルの構成コンパートメントの関係図

時々刻々の各コンパートメントの濃度変化は、物理的な移流拡散過程と生物的な過程を考慮した次の輸送方程式により算出される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial uCD}{\partial x} + \frac{\partial vCD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right\} + F_{bio} + F_{phys} \end{aligned} \tag{17}$$

- C : コンパートメントの濃度
- D : 水深
- F_{bio} : 生物過程によるソース、シンク項
- F_{phys} : 移流拡散以外の物理過程によるソース、シンク項
- K_H : 鉛直拡散係数
- A_H : 水平拡散係数

【 植物プランクトンの時間変化 】

$$\frac{d(Chl)}{dt} = \text{光合成} - \text{細胞外分泌} - \text{死亡} - \text{捕食} - \text{沈降} \quad (18)$$

【 動物プランクトンの時間変化 】

$$\frac{d(ZO)}{dt} = \text{摂食} - \text{排泄} - \text{排糞} - \text{死亡} \quad (19)$$

【 硝酸塩の時間変化 】

$$\frac{d(NO_3)}{dt} = -(\text{光合成} - Chl\text{呼吸}) \times R_{NO_3} + \text{硝化} \quad (20)$$

【 リン酸塩の時間変化 】

$$\frac{d(PO_4)}{dt} = -(\text{光合成} - Chl\text{呼吸}) + PON\text{分解} + DON\text{分解} \quad (21)$$

【 アンモニアの時間変化 】

$$\frac{d(NH_4)}{dt} = -(\text{光合成} - Chl\text{呼吸}) \times (1 - R_{NO_3}) + PON\text{分解} + DON\text{分解} - \text{硝化} \quad (22)$$

【 溶存態有機窒素の時間変化 】

$$\frac{d(DON)}{dt} = \text{細胞外分泌} + PON\text{分解} - DON\text{分解} \quad (23)$$

【 懸濁態有機窒素の時間変化 】

$$\frac{d(PON)}{dt} = Chl\text{死亡} + ZO\text{死亡} + \text{排糞} - \text{沈降} \quad (24)$$

表-0.2 一次生産モデルのパラメータ

分類	項目	値	
植物プランクトン	最大光合成速度	2.0	/ day
	光合成の温度係数	0.063	/ °C
	半飽和定数(NO_3 、 NH_4)	3.0	$\mu\text{mol} / \text{l}$
	NH_4 選択係数	1.5	$1 / \mu\text{mol}$
	半飽和定数(PO_4)	0.15	$\mu\text{mol} / \text{l}$
	最適光強度	0.07	$\text{cal} / \text{cm}^2 / \text{min}$
	呼吸速度	0.03	/ day
	呼吸の温度依存係数	0.0519	/ °C
	細胞外分泌速度	0.135	
	植物プランクトン枯死速度	0.0281	$1 / \mu\text{mol-N} / \text{day}$
	植物プランクトン枯死の温度係数	0.069	/ °C
動物プランクトン	最大捕食速度	0.3	/ day
	捕食の温度係数	0.0693	/ °C
	捕食の閾値	0.043	$\mu\text{mol-N} / \text{l}$
	イヴレフ定数	1.4	$1 / \mu\text{mol-N}$
	動物プランクトン同化効率	0.7	
	動物プランクトン成長効率	0.3	
	動物プランクトン死亡速度	0.0585	$1 / \mu\text{mol-N} / \text{day}$
	動物プランクトン死亡の温度係数	0.0693	/ °C
分解過程	PONから NH_4 への分解速度	0.030	/ day
	PONから NH_4 への分解速度の温度係数	0.0693	/ °C
	PONからDONへの分解速度	0.030	/ day
	PONからDONへの分解速度の温度係数	0.0693	/ °C
	DONから NH_4 への分解速度	0.030	/ day
	DONから NH_4 への分解速度の温度係数	0.0693	/ °C
	硝化速度	0.030	/ day
	硝化速度の温度係数	0.0693	/ °C
光の減衰過程	光の消散係数	0.1	/ m
	植物プランクトンによる消散係数	0.0179	$1 / \mu\text{mol-N} / \text{m}$
沈降過程	植物プランクトンの沈降速度	0.173	m / day
	懸濁態粒子の沈降速度	0.432	m / day

Scientific publications in fisheries science. Selection of target institutions for benchmark evaluation

Masatsugu TAKANO^{*1}, Tomoko ITO^{*2}, Takashi HOSOBAMI^{*2}, and Yoshioki OOZEKI^{*1}

Abstract : A benchmark evaluation was carried out on scientific publications in fisheries science and related disciplines from the Japanese Fisheries Research Agency (FRA) and international research institutions. Data for the period 2000–2009 were obtained from the Web of Science. A total of 2,678 scientific papers were published by the FRA. Research institutions were classified according to their similarity to the FRA in published disciplines, and six international institutes were selected. Radar charts of the percentage of publications between 12 selected disciplines related to fisheries science were constructed for the six institutions and the FRA. The relationship between the number of publications and the Hirsch-index (h-index), estimated for six international institutions and five domestic fisheries universities, indicated a linear regression, and the performance of institutions could be compared by the relative position to the regression line.

Key words : h-index, bibliometrics, benchmark evaluation, institute evaluation

Introduction

Scientific evaluations, using metric indicators that include the number of scientific papers and the number of times cited, have been employed as indices of research activity and/or scientific achievements within/between countries and research institutions (Ueda and Kurata 1988, Tanaka 2001, King 2004). Data from online databases, such as Thomson Scientific's Web of Science (WOS), have been used in international comparative analyses (King 2004) and, in Japan, as guidelines in science and technology policy planning (NISTEP, 2005). Several indices have been proposed for the characterization of scientific output; for example, the Hirsch-index (h-index: the descending ranking number of the list of publications that corresponds to or equals the number of received citations per paper) (Hirsch 2005), and other more advanced derivative indices, such as the g-index (Egghe 2006), A-index, R-index, AR-index (Jin *et al.* 2007) and IQp (Antonakis and Lalive 2008). The h-index was shown

to be biased in comparisons between researchers from different disciplines or different age groups (van Leeuwen 2008), although the h-index can be easily applied to the evaluation of individual researchers and organizations (Kinney 2007). Thus, when the h-index is used as an indicator of scientific achievement for benchmark analyses, the selection of target institutions is crucial.

There are few studies comparing scientific publishing activities among institutions in fisheries science and related disciplines (Dong and Zhang 2007). In addition, there is no appropriate methodology to assess or compare individual research institutions in different countries and universities studying fisheries science in Japan. In this paper, we propose an approach for selecting target institutions for benchmark analyses from the publication data of scientific journals and categorized disciplines acquired from the WOS. Preliminary benchmark tests were conducted on the Fisheries Research Agency (FRA), compared to selected international institutions and domestic

2010年8月30日受理 (Received on August 30, 2010)

^{*1} Operations Evaluation Section, Headquarters, Fisheries Research Agency, 2-3-3 Minatomirai, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa 220-6115, Japan

^{*2} Tsukuba Office, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat, Ibaraki 305-8601, Japan

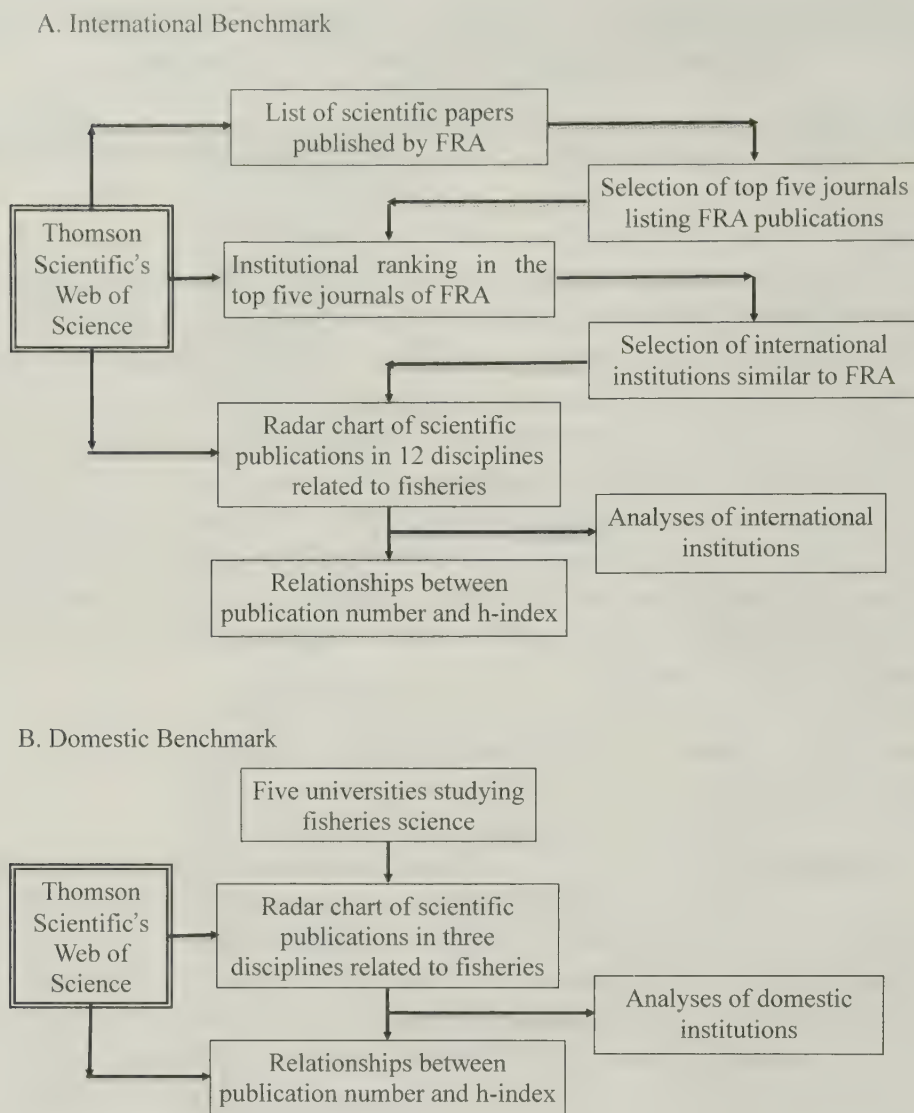


Fig. 1. Protocol for selecting target international institutions and benchmark testing (A). Domestic benchmark tests were conducted on five nominated universities studying fisheries science (B).

fisheries universities, by analyses of the relationships between the number of publications and h-index relating to fisheries science (Fig. 1). Recent changes in the scientific performance of the FRA were also compared to international institutes for an independent administrative institutions (IAI) evaluation.

Materials and Methods

Selection of similar institutions to the FRA

The numbers of papers from the FRA published

in scientific journals between 2000 and 2009 were obtained from the Thomson Scientific's Web of Science (WOS : <http://scientific.thomson.com/products/wos/>). Before accessing the data, a list of institution names, including abbreviations, was drawn up from both the names used in "Nippon Suisan Gakkaishi" (<http://www.miyagi.kopas.co.jp/JSFS/jsfs-english/E-PUB/index.html>) and from the names of Japanese institutions used in "Aquaculture" (http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/503302/description#description), because the registered institution abbreviations differ between journals in WOS (<http://thomsonscientific>

c.jp/products/wos/search_tips/index9.shtml). The following fields tag was used after considering all names of FRA institutions:

AD=(FISHERIES RES AGCY OR TOHOKU NATL FISHERIES RES INST OR NATL RES INST FAR SEAS FISHERIES OR NATL RES INST FISHERIES SCI OR SEIKAI NATL FISHERIES RES INST OR JAPAN SEA NATL FISHERIES RES INST OR NATL RES INST AQUACULTURE OR NATL CTR STOCK ENHANCEMENT OR NATL RES INST FISHERIES ENGN OR NATL SALMON RESOURCES CTR OR FISHERY RES AGCY OR FRA OR HOKKAIDO NATL FISHERIES RES INST OR JAPAN SEA FARMING ASSOC OR JAPAN SEA NATL FISHERIES INST OR NATL RES INST FAR SEAS FISHERIES OR NATL RES INST FISHERIES & ENVIRONM INLAND SEA)

The result was refined by the Countries/Territories name 'Japan'.

FRA publication data were classified by journal, then categorized into domestic (Japanese) and international journals according to the editorial society. The number of FRA publications in each journal was then counted and the top five international journals selected.

The top 30 institutions in the top five journals were listed in order of the number of publications from the WOS data and institutions listed in three or more of the five journals were selected as the candidate institutions for comparison to the FRA. Institutions showing a wide range of research activities and universities were excluded; those remaining were selected as the target institutions.

Feature analyses of FRA and other institutions

The number of the publications in the top 12 disciplines within the FRA (Fisheries, Marine & Freshwater Biology, Oceanography, Zoology, Biochemistry & Molecular Biology, Ecology, Veterinary Science, Biotechnology & Applied Microbiology, Genetics & Heredity, Microbiology, Physiology, Endocrinology & Metabolism) and the number in the same disciplines from the target institutions, as selected above, were obtained from

WOS. The same publication might be nominated in several disciplines during the WOS sorting procedure and the total number of publications from each institution might differ from the sum of publications in all disciplines. The percentage of publications in the 12 disciplines per all publications was illustrated for the target institutions in radar charts for comparison with the FRA.

Benchmark investigation

An international benchmark test was conducted by plotting the number of publications and h-index of the target institutions and the FRA plot was compared to the estimated regression line.

Five domestic universities involved in fisheries science (Tokyo University, Hokkaido University, Tokyo University of Marine Science and Technology, National Fisheries University, and Kinki University) were also compared to the FRA using WOS data. Radar chart analyses to describe the university features were conducted for the three main FRA disciplines (Fisheries, Marine & Freshwater Biology, and Oceanography), as assessed in the previous analyses (see Results). The number of publications and h-index was investigated by regression analysis in comparison with the international institutions.

Recent changes in performance

Recent changes in the scientific performance of the target institutions and FRA were also compared. In Japan, IAI is evaluated every year by their governing Ministries and the Commission on Policy Evaluation and Independent Administrative Agency Evaluation (<http://www.soumu.go.jp/english/aeb/index.html>). The Minister then reviews all IAI business after a mid-term objective period of 3 – 5 years. The performance of the FRA during the first and second mid-term periods (2001 – 2006 and 2006 – 2011 for data obtained during 2006 – 2009) was then compared in relation to the target international institutions. The three main FRA disciplines (Fisheries, Marine & Freshwater Biology and Oceanography) and the increase in FRA publications for these disciplines were compared with the six target institutions.

Table 1. List of publications in which the Fisheries Research Agency published papers during 2000 – 2009. The total number of publications from the FRA was 2,678 during 2000 – 2009.

Rank	Journals	Type	Number	%
1	Fisheries Science	Domestic	374	14.0
2	Nippon Suisan Gakkaishi	Domestic	297	11.1
3	Aquaculture	International	89	3.3
4	Fish Pathology	Domestic	88	3.3
5	Zoological Science	Domestic	80	3.0
6	Marine Ecology Progress Series	International	66	2.5
7	Journal of Oceanography	Domestic	65	2.4
8	Journal of Fish Biology	International	56	2.1
9	Fisheries Oceanography	Domestic	55	2.1
10	Ichthyological Research	Domestic	55	2.1
11	General and Comparative Endocrinology	Domestic	47	1.8
12	Fish Physiology & Biochemistry	International	40	1.5
13	Marine Biology	International	38	1.4
14	Comparative Biochemistry & Physiology - B Biochemistry & Molecular Biology	International	34	1.3
15	Fish & Shellfish Immunology	International	30	1.1
More than 30 publications		Total	1,414	52.8
		Domestic	1,061	39.6
		International	353	13.2
More than 10 publications		Total	2,026	75.7
		Domestic	1,111	41.5
		International	915	34.2

Results

Selection of similar institutions to the FRA

The total number of FRA publications was 2,678, which includes all publications that FRA researchers included in the author lists. The total number of times FRA publications were cited was 19,512, with an estimated h-index of 45 for the period 2000 – 2009. The journal list of 2,678 publications indicated that four domestic and one international journal were ranked in the top five (Table 1). These were Fisheries Science (The Japanese Society of Fisheries Science: 374), Nippon Suisan Gakkaishi (The Japanese Society of Fisheries Science: 297), Aquaculture (International Journals: 89), Fish Pathology (The

Japanese Fish Disease Society: 88), and Zoological Science (The zoological Society of Japan: 80). The top five international journals were Aquaculture (89), Marine Ecology Progress Series (66), Journal of Fish Biology (56), Fish Physiology & Biochemistry (40), and Marine Biology (38) (Table 1). Fifteen journals published more than 30 papers and the number of papers in these journals was 1,414 (52.8% of all publications). Eight journals were domestic, including English journals and seven journals were international, and the number of publications was 1,061 (39.6%) and 353 (13.2%), respectively. Fifty-four journals published more than 10 papers and the total number of papers published in the 54 journals was 2,026 (75.7%). Eleven journals were domestic and 43 journals were international, and the number of

Table 2. Number of the scientific publications in the five major journals from the target institutions during 2000 – 2009.

Journal	Institutions						
	FRA	IFREMER	IMR	DFO	NOAA	INRA	CSIC
Aquaculture	89	190	109	53	26	122	93
Marine Ecology Progress Series	66	59	65	66	198	6	113
Journal of Fish Biology	56	20	41	65	49	27	38
Fish Physiology & Biochemistry	40	4	14	4	7	16	12
Marine Biology	38	23	2	18	25	0	59
Total	289	296	229	206	305	171	315

FRA (Fisheries Research Agency, Japan), IFREMER (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, France), IMR (Institute of Marine Research, Norway), DFO (Fisheries & Oceans Canada, Canada), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA), INRA (Institut national de la recherche agronomique, France), CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Spain)

published papers was 1,111 (41.5%), and 915 (34.2%), respectively.

Seventeen institutions were listed in three journals or more of the top five FRA journals. Three institutions were listed within the top 30 places for the five journals. Those were CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Spain), University of Tasmania (Australia) and University of Washington (USA). Five institutions, IMR (Institute of Marine Research, Norway), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA), James Cook University (Australia), Bergen University (Norway), and Tokyo University (Japan) were listed in four of the five journals. Nine institutions – DFO (Fisheries & Oceans Canada, Canada), IFREMER (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, France), INRA (Institut national de la recherche agronomique, France), Chinese Academy of Science (China), Dalhousie University (Canada), Hokkaido University (Japan), Goteborg University (Sweden), University of Maryland (USA) and University of Queensland (Australia) – were listed in three of the five journals. All 17 institutions are involved in similar disciplines to the FRA; however, institutions with a wide scope of research and universities were

excluded. Thus, five institutions (IMR, NOAA, DFO, IFREMER, INRA) and a high-ranking institution in all five journals (CSIC) were selected as the target institutions for comparison with the FRA.

The number of scientific publications in the five journals is listed in Table 2. These five international journals have the following features:

Aquaculture : 5,099 papers were published over 10 years (2000–2009). FRA contributed 89 papers – in 9th place; IFREMER was in first place with 190 papers, and the number of papers from Japan was 368.

Marine Ecology Progress Series : 5,049 papers were published and FRA contributed 66 papers during 2000–2009. FRA was in 18th place; NOAA was in first place with 156 papers. The number of papers from Japan was 278.

Journal of Fish Biology: 3,416 papers were published during 2000–2009 and FRA contributed 56 papers. FRA was in fourth place and UBC (the University of British Columbia, Canada) was in first place with 68 papers. The number of papers from Japan was 206.

Fish Physiology & Biochemistry : 731 papers were published over 10 years (2000 – 2009), with the

Table 3. Number of publications from seven institutions sorted by the 12 disciplines during 2000–2009. Abbreviations are as in Table 2.

Disciplines	Institutions						
	FRA	IFREMER	IMR	DFO	NOAA	INRA	CSIC
Fisheries	1,224	663	720	865	948	365	418
Marine & Freshwater Biology	627	1,004	1,033	1,026	1,468	451	1,625
Oceanography	367	682	576	579	1,379	40	841
Zoology	281	125	81	123	272	672	1,011
Biochemistry & Molecular Biology	205	184	83	49	76	3,097	5,090
Ecology	205	232	336	287	678	1,128	2,014
Veterinary Sciences	170	93	56	85	74	1,655	372
Biotechnology & Applied Microbiology	81	130	24	27	38	1,941	1,750
Genetics & Heredity	68	73	26	37	55	1,650	1,259
Microbiology	68	169	29	19	38	1,915	1,871
Physiology	67	50	35	21	21	466	312
Endocrinology & Metabolism	66	24	20	12	23	842	448

FRA contributing 40 papers. The FRA was in first place; the NIBB (National Institute for Basic Biology, Japan) was in second with 32 papers. The number of papers from Japan was 148.

Marine Biology : 2,769 papers were published over 10 years (2000–2009) and the FRA contributed 38 papers. The FRA was in sixth place; in first place was the Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (Germany) with 70 papers. The number of papers from Japan was 206.

Analyses of FRA and other institutions

The number of scientific publications from the FRA and the six target institutions, sorted by discipline, was obtained from the WOS and shown in Table 3. For each discipline, the FRA was ranked as follows among the target institutions: Fisheries (1st), Marine & Freshwater Biology (6th), Oceanography (6th), Zoology (3rd), Biochemistry & Molecular Biology (3rd), Ecology (7th), Veterinary Science (3rd), Biotechnology & Applied Microbiology (4th), Genetics & Heredity (4th), Microbiology (4th),

Physiology (3rd), and Endocrinology & Metabolism (3rd).

For the FRA, the percentages of publications for the 12 disciplines were as follows (Fig. 2): Fisheries (45.7%), Marine & Freshwater Biology (23.4%), Oceanography (13.7%), Zoology (10.5%), Biochemistry & Molecular Biology (7.7%), Ecology (7.7%), Veterinary Science (6.4%), Biotechnology & Applied Microbiology (3.0%), Genetics & Heredity (2.5%), Microbiology (2.5%), Physiology (2.5%) and Endocrinology & Metabolism (2.5%). Institutions with a high percentage of publications (30% or more) in Fisheries and Marine & Freshwater Biology were FRA, IMR and DFO, and IMR and DFO, respectively. Three institutions, NOAA, INRA and CSIC, showed no prominent discipline (less than 30%). The analysis of each institution, including FRA, is described as follows:

FRA: Almost 50% of publications were related to Fisheries; <30% were published in other disciplines: Marine & Freshwater Biology, Oceanography, and Zoology. The FRA was a major institution in the field of Applied Fisheries,

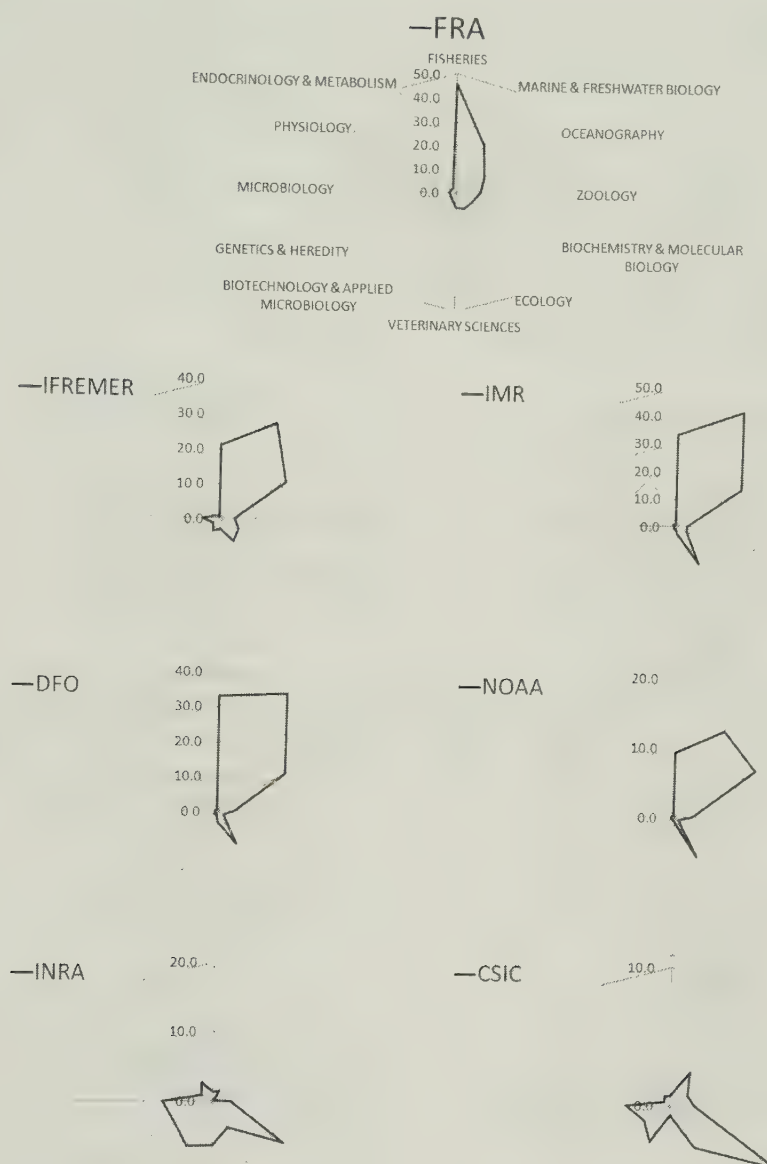


Fig. 2. Radar charts of the percentage of publications in 12 disciplines related to fisheries from seven institutions. Abbreviations of the seven institutions are shown in Table 2.

ranking first out of seven institutions in Fisheries.

IFREMER : The total number of publications from IFREMER was 3,398, with a total of 35,781 citations. The average number of times cited was 10.53 and the h-index was 57. This institution is categorized as basic biology because Marine & Freshwater Biology was ranked third out of the total number of publications in the 12 disciplines (3,429 publications). The study of Marine &

Freshwater Biology is supported by that of Oceanography and Fisheries.

IMR : The total number of publications from the IMR was 1,348 with a total times cited of 13,663. In the results, the average times cited was 10.14 and the h-index was 44. This institution majored in Oceanography and Ecology, in contrast to the IFREMER, although the characteristics of this institution were similar to the IFREMER because

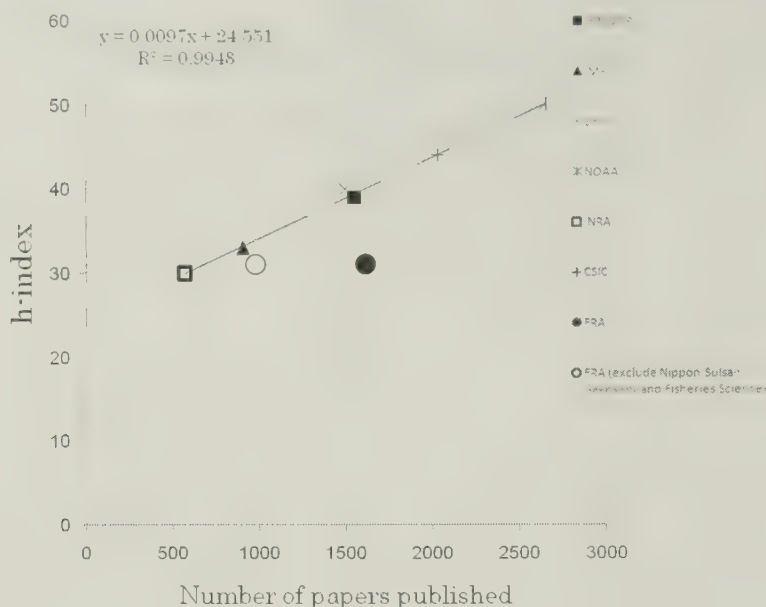


Fig. 3. Number of papers published and h-index in three major disciplines from seven institutions (FRA, IFREMER, IMR, DFO, NOAA, INRA, CSIC) during 2001–2009. A regression curve was estimated for six target international institutions. The FRA data are shown as a black circle for all publications and as a white circle with two Japanese journals exclude.

the stem discipline was Marine & Freshwater Biology with the support of both Oceanography and Fisheries. These differences might be related to the higher ratio of Fisheries than that in the IFREMER.

DFO : Total number of publications of the IMR was 2,629 and total number of times cited was 29,317. Thus, the average times cited was 11.15 and the h-index was 56. This institution was ranked in the middle, between FRA and IMR, because the percentage of Fisheries papers was highest in the international target institutions and the chart was similar to IMR. It differed from the FRA in that the percentage in Ecology was high and that in other disciplines, such as Biochemistry & Molecular Biology, was low.

NOAA : The shape of the radar chart was similar to both IFREMER and IMR, although the percentage of all Fisheries-related disciplines was low due to their broad coverage of disciplines. The NOAA published 3,954 reports in the field of Meteorology/Atmospheric Science of a total of 10,233 publications during 2000–2009. It differed from the FRA in that the proportion in Ecology

was high but low in areas such as Biochemistry & Molecular Biology.

INRA : The total number of publications from the INRA was 28,740 owing to its broad coverage of disciplines. The highest number of publications was in Plant Sciences (3,420). Therefore, the percentages were low in all 12 disciplines, although the percentage in Biochemistry & Molecular Biology was high.

CSIC: The total number of publications from CSIC was 58,407, with the highest number (5,090) in Biochemistry & Molecular Biology. Although Biochemistry & Molecular Biology had the highest number, the percentage was low (8.7%) due to the broad coverage of disciplines. The percentage of papers in Fisheries was 0.72%.

Benchmark investigation

The relationship between the number of publications and h-index in the three main three disciplines for the FRA and six target institutions showed a positive correlation, an increase in the h-index indicated an increase in the number of

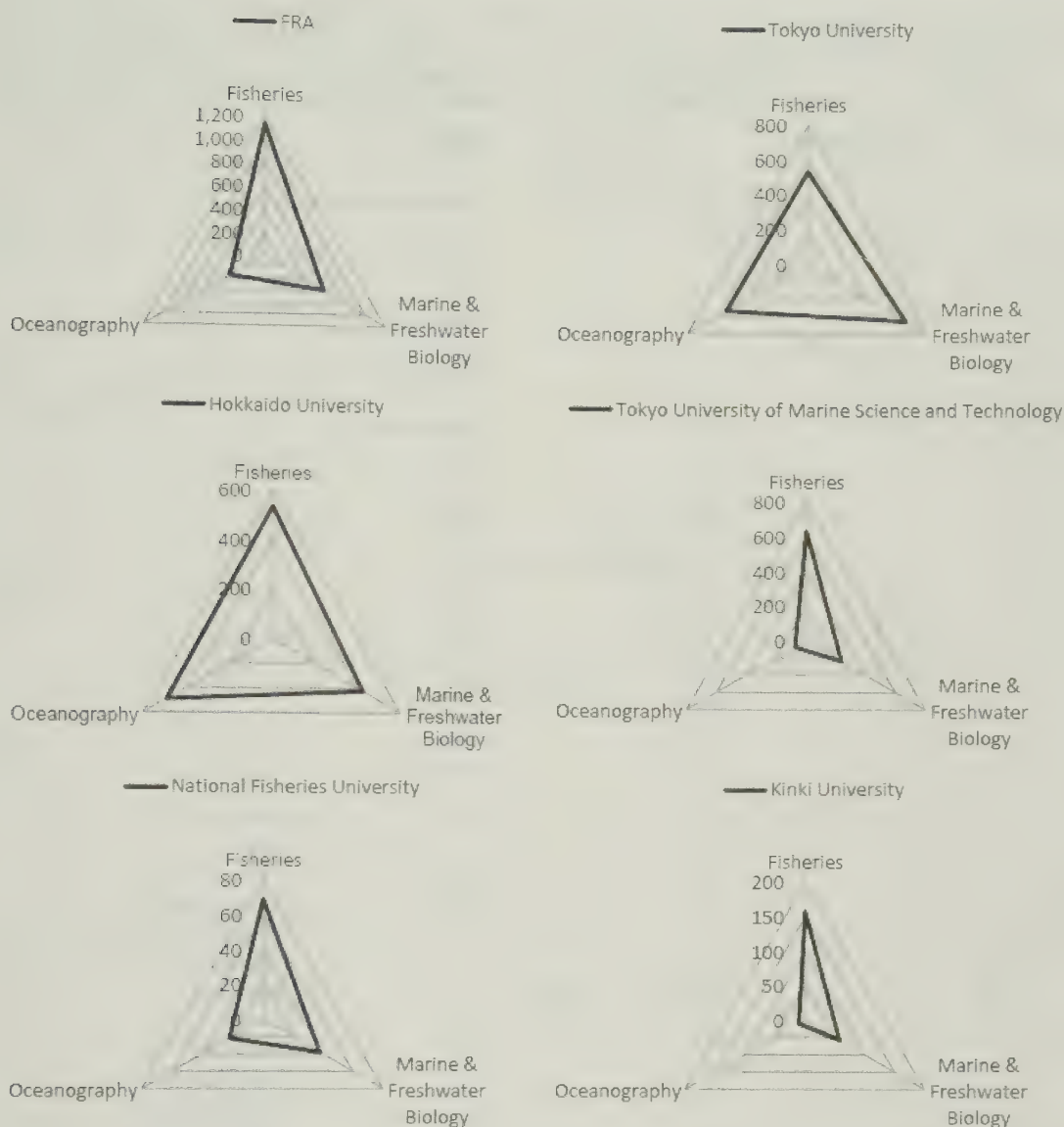


Fig. 4 Radar charts of the three major disciplines (Fisheries, Marine & Freshwater Biology and Oceanography) at Japanese institutions (FRA, Tokyo University, Hokkaido University, Tokyo University of Marine Science and Technology, National Fisheries University, Kinki University).

papers (Fig. 3). From the regression line, the FRA was at a lower position compared to other institutions. The difference, however, was not significant from this positive correlation in the number of papers and h-index when two domestic journals (Nippon Suisan Gakkaishi and Fisheries Science) were excluded from the FRA data.

Radar chart analyses of the number of publications from five domestic universities involved in fisheries science (Tokyo University, Hokkaido University, Tokyo University of Marine Science and

Technology, National Fisheries University, and Kinki University) were conducted on the three major FRA disciplines (Fisheries, Marine & Freshwater Biology and Oceanography). (Fig. 4) Although it was difficult to extract accurate statistics due to the broad range of disciplines studied by several universities, the features of the five universities are described as follows:

Tokyo University : The number of publications from Tokyo University was almost equal in the three disciplines, although the number in Marine

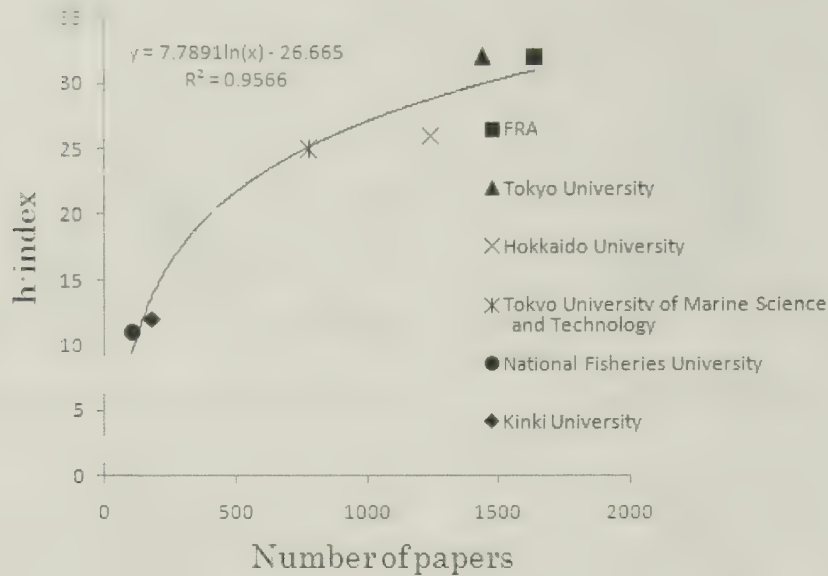


Fig. 5. Number of papers published and h-index in the three major disciplines from six Japanese institutions, as in Fig. 4, during 2001–2009. A regression curve was estimated at all institutions.

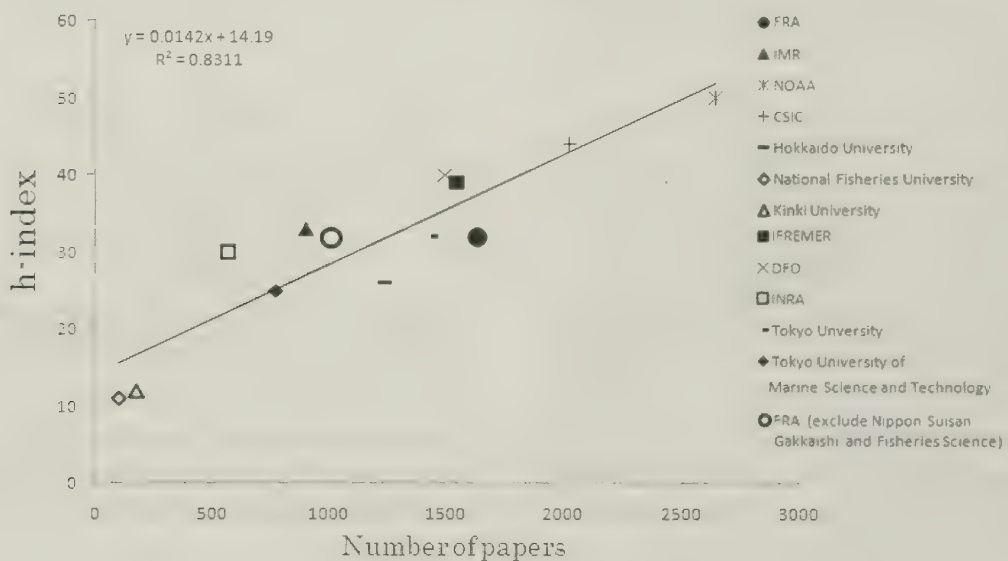


Fig. 6. Number of papers published and h-index in the three major disciplines at all institutions during 2001–2009. A regression curve was estimated at all institutions.

& Freshwater Biology was slightly higher.

Hokkaido University : The number of publications from Hokkaido University was almost equal in the three disciplines, although the number in Marine & Freshwater Biology was lower than the others.

Tokyo University of Marine Science and Technology : Fisheries was the main discipline

in the Tokyo University of Marine Science and Technology; the number of publications in Marine & Freshwater Biology and Oceanography was low.

National Fisheries University : National Fisheries University had a similar pattern to the Tokyo University of Marine Science and Technology.

Table 4. Changes in the number of papers published in three major disciplines (Fisheries, Marine & Freshwater Biology, Oceanography) from seven institutions (FRA, IFREMER, IMR, DFO, NOAA, INRA, CSIC) during the periods 2001–2006 and 2006–2009.

Institution	Period, ratio	Fisheries	Marine & Freshwater Biology	Oceanography	Total
FRA	2001–2009	1,130	589	344	1,631
	A (2001–2006)	727	359	236	1,039
	B (2006–2009)	542	301	145	787
	B:A (per year)	1.12	1.26	0.92	1.14
IFREMER	2001–2009	636	974	680	1,543
	A (2001–2006)	384	557	376	891
	B (2006–2009)	328	533	382	838
	B:A (per year)	1.28	1.44	1.52	1.41
IMR	2001–2009	582	627	342	903
	A (2001–2006)	345	353	172	510
	B (2006–2009)	332	349	205	508
	B:A (per year)	1.44	1.48	1.79	1.49
DFO	2001–2009	775	939	533	1492
	A (2001–2006)	509	596	301	936
	B (2006–2009)	332	431	289	698
	B:A (per year)	0.98	1.09	1.44	1.12
NOAA	2001–2009	861	1371	1,297	2,644
	A (2001–2006)	502	744	760	1521
	B (2006–2009)	452	784	677	1421
	B:A (per year)	1.35	1.58	1.34	1.4
INRA	2001–2009	364	450	40	569
	A (2001–2006)	228	278	27	360
	B (2006–2009)	170	225	18	273
	B:A (per year)	1.12	1.21	1	1.14
CSIC	2001–2009	385	1,515	790	2,024
	A (2001–2006)	240	898	437	1,180
	B (2006–2009)	198	823	437	1,104
	B:A (per year)	1.24	1.38	1.5	1.4

Fisheries was the main discipline; the number of publications in Marine & Freshwater Biology and Oceanography was low.

Kinki University : Kinki University also had a similar pattern to the Tokyo University of Marine Science and Technology, although few publications

were published in Oceanography.

Tokyo University and Hokkaido University showed a similar pattern with almost equal numbers in the three disciplines. Meanwhile, the FRA and National Fisheries University showed a similar

tendency, although they differed in the number of papers published. Tokyo University of Marine Science and Technology was similar to Kinki University due to the low number of publications in Oceanography.

The relationship between the number of publications and the h-index indicated a positive correlation between the five domestic universities and the FRA, although the relationship was logarithmic (Fig. 5).

Japanese and International institutions showed a positive correlation, with an increase in the h-index with increasing number of papers published (Figure 6). When two journals (Nippon Suisan Gakkaishi and Fisheries Science) were excluded from the FRA data, eliminating the influence of domestic journals, all the institutions, including the FRA, could be plotted on the regression curve.

Recent changes in performance

The performance of the seven institutions during the first and second mid-term period (we used the period 2006-2009, as data for the full 2006-2010 mid-term are not yet compiled) was compared by the number of papers published per year (Table 4). For all institutions, the number of publications per year increased, with IMR in particular showing a 1.5-fold increase. During the period 2001 – 2006, FRA was ranked in first place in the discipline of Fisheries, 5th place in Marine & Freshwater Biology and sixth place in Oceanography (Table 4). However, the rankings in Marine & Freshwater Biology and Oceanography dropped to sixth and seventh place, respectively, during 2006 – 2009, although Fisheries was still ranked in first place.

Discussion

Data on the publications emanating of scientific institutions, accessed via the internet, are valuable in selecting target institutions for benchmark testing; however, the results are highly dependent on the database. Between 1999 and 2008, the WOS recorded 2,537 publications from the FRA, while the Council for Science and Technology Policy (CSTP) reported the number as 2,348 (CSTP 2009). In 2008,

the CSTP reported 3,827 as the number of citations, but our research indicated 4,056. These differences could be due to the source database: the CSTP used the "ISI National Citation Report for Japan 1999 – 2008 (NCR-J)", which may differ in institution names, including abbreviations. For example, the number of publications from the FRA was 2,348 during 1999 – 2008, when "JAPAN SEA FARMING ASSOC", "NATL CTR STOCK ENHANCEMENT", "NATL SALMON RESOURCES CTR" and "FISHERY RES AGCY" were excluded from the field tags that we used. Related to this issue, other databases, such as Scopus, are becoming increasingly active (LaGuardia 2005, Meho and Rogers 2008) and the number of journals collected in these databases have been increasing. Therefore, reliability should increase with an increase in data.

Analysis revealed that the seven target institutions could be divided into three categories: (1) major institution in Fisheries (FRA), (2) major institution in Marine & Freshwater Biology (IFREMER, IMR, DFC, NOAA), and (3) major institution in Marine & Freshwater Biology but not in Fisheries (INRA, CSIC). FRA excelled in the three major disciplines (Fisheries, Marine & Freshwater Biology and Oceanography) and was ranked at the first place in Fisheries. INRA and CSIC are integrated research institutions that publish a large number of papers not only in Fisheries but also in a broad range of disciplines. These two institutions are included for comparison by restricting the disciplines to 12 or three categories, as same for the FRA. Overseas universities were also excluded from the comparison; however, these universities could be used in future comparisons with the FRA due to their active publishing activity in Fisheries.

The relationship between the number of papers and h-index indicated that the h-index of the FRA was lower than other institutions but, when Nippon Suisan Gakkaishi and Fisheries Science were excluded, the h-index was similar to other organizations. This means that the research achievements of Japanese institutions, including the FRA, and overseas institutions were almost equal. However, these findings also suggested that domestic journals are rarely cited by international institutions; a fact that should be considered

when international and Japanese institutions are compared. This discrepancy should be resolved at an institutional level by encouraging submissions to international journals, while opening discussions on language, the number of journals and the evaluation of papers collected in databases (Archambault *et al.* 2006, Stergiou and Tsikliras 2006).

Differences in the number of researchers and the budget of these institutions should be considered in international benchmarking, although the difficulties for obtaining information on the number of researchers (not total staff numbers) and scientific funding. Nevertheless, the number of publications per researcher or per amount of scientific funding should be standardized in future studies. Furthermore, institutions including the FRA have several missions other than scientific publications, those are the promotion of domestic fisheries industry and the technical assistance for prefectures in Japan. Therefore, the other multidimensional indices for the benchmark evaluation should be searched in future analyses.

Temporal analyses revealed the shift of strategic focus of science in institutions and/or the results of reorganization of institutions. In this context, the recent reorganization of the FRA might reflect in the decrease of publications in Oceanography and in the increase in Marine & Freshwater Biology (Table 4). Therefore, this analysis is considered useful not only in the assessment of the achievement of mid-term policy of FRA but also in the planning of the policy, and should be conducted at 3 – 5-year intervals for mid-term policy planning and evaluation.

Acknowledgments

This work would not have been possible without the support of the librarians of Tsukuba Office, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat. The authors thank the staff of the Operations Evaluation Section of the Japan Fisheries Research Agency for their helpful comments.

References

- Antonakis, J., and Lalive R. 2008: Quantifying Scholarly Impact: IQp versus the Hirsch h. *Journal of the American Society for information Science and Technology*, **59**, 956–969.
- Archambault, É., Vignola-Gagne, É., Côté, G., Larivière, V., and Gingras, Y., 2006: Benchmarking scientific output in the social sciences and humanities: The limits of existing databases. *Scientometrics*, **68**, 329–342.
- Council for Science and Technology Policy (CSTP). 2009: The findings about the activity such as an incorporated administrative agency, the national university corporation about technology (2009). (<http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihu87/siryoo3-3-8.pdf>, in Japanese).
- Dong, M.Q., and Zhang H.H. 2007: Characterization of SCIE papers compared among five universities with fishery or marine disciplines. *Journal of Shanghai Fisheries University*, **6**, 368–373.
- Egghe, L., 2006: Theory and practice of the g-index. *Scientometrics*, **69**, 131–152.
- Hirsch, J.E. 2005: An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, **102**, 16569–16572.
- Jin, B., Liang, L., Rousseau, R., and Egghe, L., 2007: The R- and AR-indices. Complementing the h-index. *Chinese Science Bulletin*, **52**, 855–863.
- King, D.A. 2004: The scientific impact of nations. *Nature*, **430**, 311–316.
- Kinney, A.L., 2007: National scientific facilities and their science impact on nonbiomedical research. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, **104**, 17943–17947.
- LaGuardia, C., 2005: Scopus vs. Web of Science. *Library Journal*, **130**, 40–41.
- Meho, L.I., and Rogers, Y., 2008: Citation Counting, Citation Ranking, and h-index of human-computer interaction researchers: A comparison between Scopus and Web of Science. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, **59**, 1711–1726.
- National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP), 2005: Study for Evaluating the Achievements of the S&T Basic Plans in Japan, Comparative Analysis on S&T Policies and Their Achievements between Major Countries.

NISTEP report no. 91 (in Japanese)

Stergiou, K.L., and Tsikliras, A.C., 2006:

Underrepresentation of regional ecological research output by bibliometric indices. *Ethics in Science and Environmental Politics.*, **6**, 15-17.

Tanaka, H., 2001: Bibliometrics by using Web of Science. The Journal of the Information Science and Technology Association., **44**, 2-7 (in Japanese)

Ueda, S., and Kurata, K., 1988: National productivity of journal articles as index of research activities. The Journal of the Information Science and Technology Association., **38**, 217-223 (in Japanese)

van Leeuwen, T., 2008: Testing the validity of the Hirsch-index for research assessment purposes. *Research Evaluation.*, **17**, 157-160.

水産学における学術論文のベンチマーク評価 ーベンチマーク評価のための対象機関の選定ー

高野正嗣（水研セ）・伊藤智子（農林水産技術会議）・
細羽見喬（農林水産技術会議）・大関芳沖（水研セ）

我が国における第3期科学技術基本計画（平成18年3月28日閣議決定）ならびに現在検討中の第4期科学技術基本計画においては、国際ベンチマークの必要性が強く謳われているが、我が国の水産研究機関ではこれまで国際ベンチマーク調査の報告はない。そこで水産総合研究センターを含む各国の水産関係機関の特徴を把握し、ベンチマーク評価を行うために学術文献データベースを用いた調査を実施した。Web of Scienceにより水研センターの2000～2009年の発表論文数を調べ、水研センターにおける論文数上位5国際誌を用いて、各機関における順位と論文数を基に比較対象機

関を選定した。さらに水研センターの研究分野別論文数から、上位12分野について比較対象機関における各分野の割合から各機関の特徴を比較した。上位3分野（水産学、海洋・淡水生物学、海洋学）について論文数とh-indexの関係を比較することで、各機関の特徴を抽出した。水研センターの2000～2009年の発表論文数は2,678報であった。論文数上位5国際誌による比較から、IFREMER（フランス海洋開発研究所）、IMR（ノルウェー海洋研究所）、DFO（カナダ漁業海洋省）、NOAA（アメリカ海洋大気局）、INRA（フランス国立農学研究所）、CSIC（スペイン国立研究協議会）が水研センターとの比較可能機関として選ばれたが、これらの機関と比較すると、水研センターの論文は水産学に集中していた。論文数とh-indexとの関係はばらつきのある正相関を示しており、プロットの位置から見ると水研センターは標準的なパフォーマンスを示していた。

水産総合研究センター研究報告

Bulletin of Fisheries Research Agency

編集委員会

編集委員長 和田時夫

編集委員 横山雅仁, 武内智行, 皆川 恵, 中山一郎, 本多 仁, 岸田 達,
鈴木満平, 北川大二, 伊藤文成, 奈良和俊, 岩本明雄, 堀川博史

平成23年1月31日 発行

発行所 独立行政法人 水産総合研究センター

〒220-6115 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-3-3 クィーンズタワー B 15階

Fisheries Research Agency

Queen's Tower B 15F, 2-3-3, Minato mirai, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa.

220-6115 Japan

<http://www.fra.affrc.go.jp>

発行者 松里壽彦

印刷所 日昇印刷株式会社

ISSN 1346-9894

BULLETIN OF FISHERIES RESEARCH AGENCY

No. **34**
January 2011

Bull. Fish. Res. Agen.

CONTENTS

Preface

Makoto Yamasaki

Research review on the relationship between macroalgal-production and nutrients, and
relative assessment of the nutrient conditions on macroalgae in the Seto Inland Sea

Goro Yoshida, Yoko Niimura, Kenji Tarutani, and Masami Hamaguchi 1

Relationship among primary production, marine environment and fisheries production
of bivalves in the Seto Inland Sea

Masami Hamaguchi 33

Review of characteristics on the current and nutrients distribution of Seto Inland Sea,
and development of the hydrodynamic model coupled with primary production model
applied to this region

Akiyoshi Nakayama 49

Scientific publications in fisheries science. Selection of target institutions for benchmark evaluation

Masatsugu Takano, Tomoko Ito, Takashi Hosobami, Yoshioki Oozeki 71